

基于特征模分析提高高频增益的宽带超表面天线设计

刘海龙^{1,2,3}, 冯彩霞^{1,2,3*}, 董丽娟^{1,2,3}, 高岩¹, 杨梓^{1,2,3}, 张博昊^{1,2,3}, 郭亚如¹, 许鑫¹

(1. 山西大同大学 物理与电子科学学院, 山西 大同 037009;

2. 山西大同大学 固体物理研究所, 山西 大同 037009;

3. 山西大同大学 微结构电磁功能材料山西省重点实验室, 山西 大同 037009)

摘要:本文提出了一种工作频带内增益波动小于2.2 dB的宽带超表面天线。天线由三层金属和两层介质构成, 上层金属采用表面电流设计自由度比较高的非周期结构, 中间金属接地层刻蚀矩形缝隙, 下层金属为微带馈线。初始天线的超表面结构为4×4的非周期金属贴片, 初始天线的阻抗带宽为4.89 GHz~7.5 GHz, 工作频带内低频段的增益在6.7 dBi~8.9 dBi之间, 但是天线在7.4 GHz的增益仅为3.4 dBi。之后利用特征模分析法对初始超表面进行分析和优化。通过在P2单元加载y方向缝隙, 抑制7.4 GHz附近辐射特性旁瓣较大的高阶模式, 而不影响辐射特性良好的基本模式, 从而提高天线在7.4 GHz的增益。优化后的天线阻抗带宽为4.89 GHz~7.41 GHz, 相对带宽为41%, 7.4 GHz的增益从3.4 dBi提高到7.28 dBi, 整个工作频带内增益为6.7 dBi~8.9 dBi。之后对天线进行了加工测试, 实验结果与仿真结果基本一致。本文设计的天线覆盖了5 GHz宽带无线接入频段和车联网频段, 应用场景广泛。

关键词:超表面天线; 特征模分析法; 带宽; 增益

中图分类号: TN82 文献标志码: A 文章编号: 0253-2395(2025)05-0964-09

Broadband Metasurface Antenna with High-frequency Gain Enhancement Based on Characteristic Mode Analysis

LIU Hailong^{1,2,3}, FENG Caixia^{1,2,3*}, DONG Lijuan^{1,2,3}, GAO Yan¹, YANG Zi^{1,2,3}, ZHANG Bohao^{1,2,3}, GUO Yaru¹, XU Xin¹

(1. College of Physics and Electronics, Shanxi Datong University, Datong 037009, China;

2. Institute of Solid State Physics, Shanxi Datong University, Datong 037009, China;

3. Shanxi Province Key Laboratory of Microstructure Electromagnetic Functional Materials, Shanxi Datong University, Datong 037009, China)

Abstract: This paper proposed a broadband metasurface antenna with gain fluctuation less than 2.2 dB within the operating bandwidth. The antenna consists of three metal layers and two substrate layers. The upper metal layer employs a non-periodic structure, offering greater design freedom for surface current, the middle metal layer is etched with rectangular slots and grounded, and the bottom metal layer is a microstrip feedline. The original MTS structure is a 4×4 array of non-periodic metal patches, and the antenna has an impedance bandwidth of 4.98–7.5 GHz. Within the operating frequency band, the realized gain in the low-frequency range is between 6.7 to 8.9 dBi, while at 7.4 GHz is only 3.4 dBi. Subsequently, characteristic mode analysis (CMA) is used to analyze and

收稿日期: 2025-03-01; 接受日期: 2025-05-06

基金项目: 山西省自然科学基金(202303021211182); 山西省高等学校科技创新项目(2023L258); 大同市应用基础研究(2023066); 山西大同大学基础科研基金(2022K6); 山西大同大学2023年大学生创新创业计划(20240929)

作者简介: 刘海龙(1989—), 男, 山西大同人, 博士, 讲师, 研究方向为微带天线、超表面贴片天线。E-mail: liuhl@sxdtdx.edu.cn

* 通信作者: 冯彩霞(FENG Caixia), E-mail: fcxtdx@163.com

引文格式: 刘海龙, 冯彩霞, 董丽娟, 等. 基于特征模分析提高高频增益的宽带超表面天线设计[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2025, 48(5): 964-972. DOI: 10.13451/j.sxu.ns.2025061.

optimize the modal properties of the original MTS. By loading slots in the y -direction on the P2 unit, the high-order modes with high sidelobes near 7.4 GHz are suppressed, while the fundamental mode with broadside radiation patterns remains unaffected. As a result, the realized gain at 7.4 GHz is enhanced from 3.4 dBi to 7.28 dBi. The optimized antenna achieves an impedance bandwidth of 4.89-7.41 GHz, with a relative bandwidth of 41% and the realized gain of 6.7-8.9 dBi. The proposed antenna was fabricated and measured, and the experimental results are in good agreement with the simulation results. The proposed antenna covers the 5 GHz broadband wireless access band and the Vehicle-to-Everything (V2X) band, making it suitable for a wide range of applications.

Key words: metasurface antenna; characteristic mode analysis; bandwidth; gain

0 引言

超表面(Metasurface, MTS)在电磁波调控方面具有巨大的潜力,为电磁学、光学和天线技术的发展提供了新的思路和方法。基于超表面的天线能够实现低剖面、高增益、宽带宽等特性^[1]。特征模分析法能够揭示天线结构的固有电磁特性,常用于超表面天线的设计^[2-7]。然而,在设计宽带超表面天线时,天线工作频段的高频处通常包含大量高阶模式,这些模式的辐射特性具有较大的旁瓣^[8]。如果未经优化的高阶模式在高频段占有较大比重,将会导致宽带超表面天线在高频处的增益降低,从而显著降低通信质量^[9]。

超表面天线常采用特征模分析法优化天线辐射性能。Nie等^[1]通过在 4×4 方形超表面单元的外侧贴片与金属地之间加载金属过孔,有效降低了天线的交叉极化。Xue等^[10]采用在同轴探针馈电的贴片上加载双缝隙的方式,显著降低了H面的交叉极化。Ntawangaheza等^[11]采用相对较大的超表面横向尺寸支持同相电流,提高了天线增益。Yu等^[12]通过特征模分析法设计馈电位置。特征模分析法还被用于小型化超表面天线^[13]、滤波超表面天线^[14],全向天线^[15-16],以及具有不同极化特性的超表面天线设计中^[17-24]。Naik等^[25]提出的低剖面宽带波束分集超表面天线,其工作带宽为20.24%,隔离度优于38 dB。Chen等^[26]提出的非周期超表面天线在保持周期性超表面天线相同尺寸的情况下,利用非周期超表面更灵活的设计自由度调控表面电流,实现了更大的带宽和更好的增益特性。

此外,还可以利用特征模分析法抑制旁瓣较大的高阶模式,从而改善天线的辐射特性^[27-30]。例如在超表面的单元格上加载槽和过

孔^[9]、使用两种形状的辐射结构组成超表面^[25],或者减小接地面的尺寸^[27]。Qiu等^[29]提出了一种宽带介质谐振器馈电的超表面天线,根据辐射方向图的叠加原理,利用介质谐振器在轴向产生的辐射最大值将高阶模的辐射特性优化为宽侧辐射,从而改善天线增益的平坦度。

本文提出了一种工作频带内增益波动小于2.2 dB的宽带超表面天线。初始天线的超表面结构由 4×4 的非周期金属贴片构成,天线得到4.89 GHz~7.5 GHz的阻抗带宽,但增益在7.4 GHz处明显降低。利用特征模分析法对初始超表面进行分析,发现7.4 GHz处存在辐射图旁瓣较大的高阶模式。这些高阶模在P2单元的反相电流较大,而辐射特性良好的基本模式在P2单元的电流分布较小。随后,为了优化高阶模式并提高天线在高频段的增益,在P2单元沿加载两个沿 y 轴的缝隙,以切断高阶模的部分电流路径,同时不影响基本模式的电流分布和辐射特性。对优化后的超表面进行特征模分析,原来位于7.4 GHz的高阶模式 J_{55} 移出了期望工作频带。优化后的天线在7.4 GHz增益从3.4 dBi提高到7.28 dBi。通过加载缝隙抑制高阶模的方式提高高频增益,最终以 $0.07\lambda_0$ 的剖面实现了阻抗带宽为4.89 GHz~7.41 GHz、增益波动小于2.2 dB的宽带超表面天线。

1 宽带超表面天线结构

本文所设计的宽带超表面天线结构如图1所示,天线由两层介质基板和三层金属贴片组成,上层为超表面结构,中间金属层为刻蚀矩形槽的接地层,下层金属为微带馈线。图1(a)和图1(b)分别为超表面I和超表面II的结构图。超表面I包含 4×4 非周期金属贴片,四组

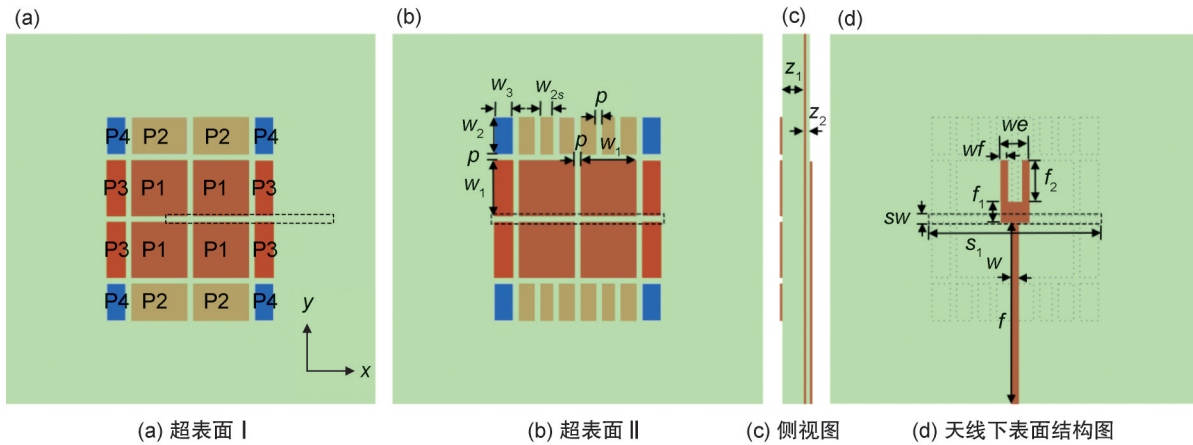


图1 宽带超表面天线结构图

Fig. 1 Geometry of the proposed broadband MTS antenna

不同尺寸的贴片分别标记为P1—P4。超表面II在贴片P2上加载宽度为 ρ 的 y 方向缝隙。天线侧视图和下表面结构图分别如图1(c)和图1(d)所示。初始天线由超表面I和馈电结构组成,优化后天线由超表面II和馈电结构组成。初始天线和优化后天线的馈电结构相同,均由底部的微带线馈电,经中间接地板上蚀刻的矩形槽激励。介质基板为Rogers RO4003C,相对介电常数为3.55,损耗正切为0.002 7,厚度分别为3.454 mm和0.508 mm。天线的结构参数列于表1中。

表1 天线结构参数

Table 1 The structure parameters of the antenna (Units: mm)

参数	w_1	w_2	w_3	ρ	s_1	s_w	w_{2s}	z_1
取值	9	6	3	1	28	1.6	2	3.454
参数	z_2	w	f	f_1	f_2	we	wf	Null
取值	0.508	1.14	29.3	3.33	6.67	4.56	1.14	Null

2 宽带超表面天线的设计与仿真

2.1 初始天线的仿真与分析

天线仿真采用CST Microwave Studio进行。图2为去除超表面层、只包含接地层缝隙和微带线构成的缝隙天线与初始天线 $|S_{11}|$ 的对比。缝隙天线的谐振点在7.87 GHz,初始天线的谐振点在5.44、6.94和7.45 GHz。初始天线的工作带宽内不包括缝隙天线的工作模式,初始天线为超表面天线。

图3是初始天线部分关键参数对 $|S_{11}|$ 的影响。图3(a)是初始超表面P1单元的边长 w_1 对

$|S_{11}|$ 的影响。 w_1 的变化主要影响低频谐振点的位置,随着 w_1 从8.5 mm增加到9.5 mm,低频谐振点位置从5.2 GHz移动到5.4 GHz。当 $w_1=9$ mm时,低频谐振点和高频谐振点互相合并,形成较宽的4.89 GHz~7.5 GHz的工作频带。图3(b)是初始天线耦合缝隙长度 s_1 对 $|S_{11}|$ 的影响。 s_1 的变化主要影响天线的阻抗匹配。当 $s_1=28$ mm时,天线阻抗匹配良好,形成4.89 GHz~7.5 GHz的工作频带。

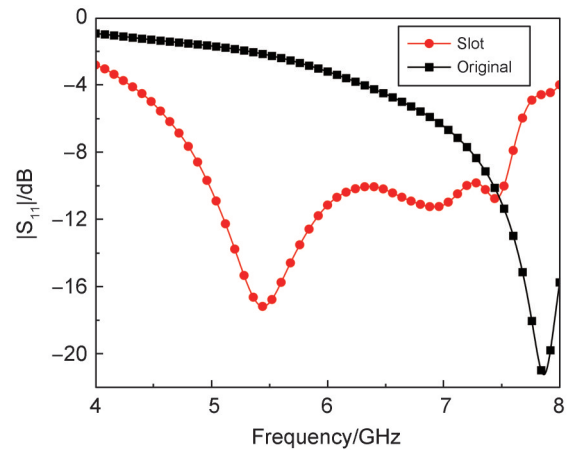


图2 缝隙天线与初始天线的 $|S_{11}|$ 变化

Fig. 2 The $|S_{11}|$ plots of the slot antenna and the original antenna

图4为初始天线的反射系数 $|S_{11}|$ 和增益曲线仿真结果,初始天线的-10 dB带宽范围为4.89 GHz~7.5 GHz。在工作频段的低频段,增益在6.7 dBi~8.9 dBi范围内,但是7.4 GHz处的增益仅为3.4 dBi,远低于低频段的增益值。为了提高天线在7.4 GHz处的增益,利用特征模分析法对超表面I的结构进行分析。根据特征模

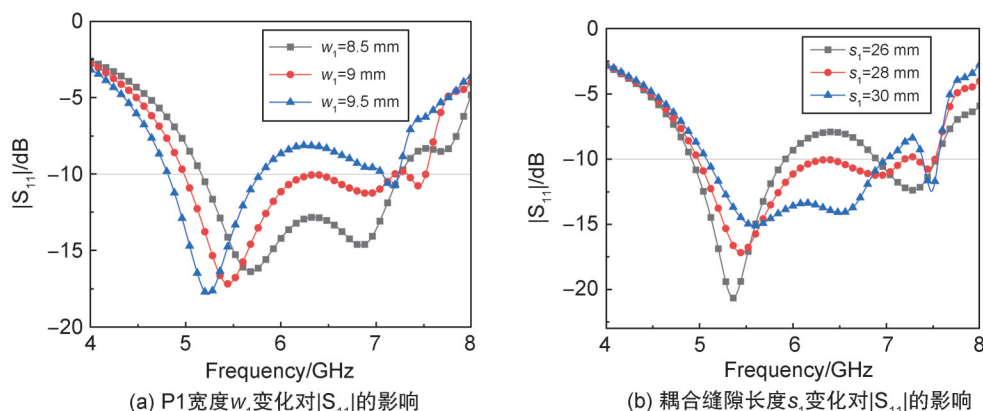


图3 初始天线参数变化对|S₁₁|的影响

Fig. 3 The impact of variations of original antenna parameter on |S₁₁|

理论^[2-4], 模式重要性 (Modal Significance, MS) 表示每个特征模式被激发的难易程度, 这一参数是超表面的固有特性, 仅由超表面的结构决定。当 MS=1 时, 该模式容易被激发; 而当 MS=0 时, 则表示该模式几乎不发生谐振或辐射。

频带^[8]。同时, 从图 5(b) 可以看出, 具有良好宽侧辐射特性的基本模式 J₁ 的电流分布主要集中在 P1 上, 因此, 在 P2 加载缝隙不会对基本模式 J₁ 产生太大影响。换言之, 优化操作不会破坏基本模式 J₁ 的宽侧辐射特性。

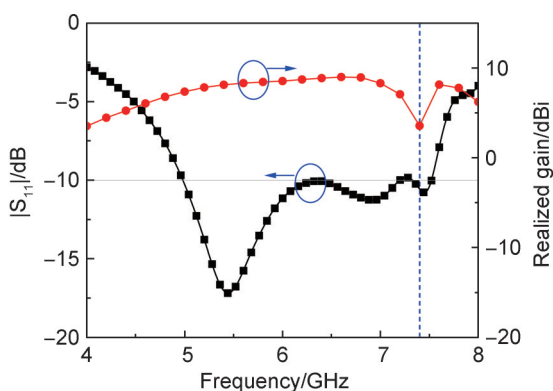


图4 初始天线的反射系数和增益曲线

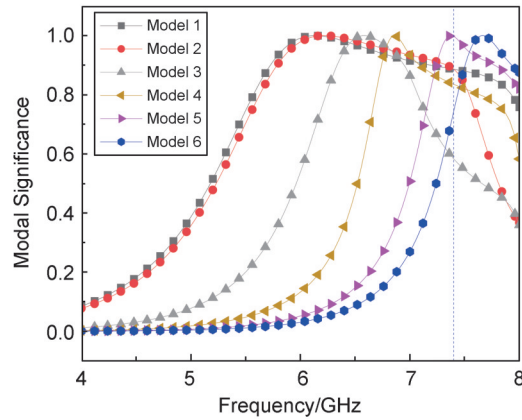
Fig. 4 The reflection coefficient and realized gain curves of the original antenna

图 5 为超表面 I 的 MS 曲线、J₁-J₆ 模式的特征电流和辐射图。由于接地层缝隙沿 x 方向, 主要激励的模式为 P1 上特征电流沿 y 方向的模式 J₁、J₃、J₄ 和 J₅。从图 5(a) 中可以看出, 在 4~8 GHz 频段内, 有多个模式的 MS 大于 0.7, 这意味着这些模式可能被有效激发。在 7.4 GHz 处, 高阶模式 J₅ 的模式比重较大。从图 5(b) 可以看到, 模式 J₅ 的谐振频率为 7.38 GHz, 并且在贴片 P2 处存在较大的反相电流, 导致 J₅ 的辐射图分瓣严重, 对天线在 7.4 GHz 处的增益产生不利影响。为了抑制这个高阶模式, 下一步将在贴片 P2 上加载垂直于反相电流的缝隙, 以截断反相电流分布, 使模式 J₅ 的谐振频率向右移出天线工作

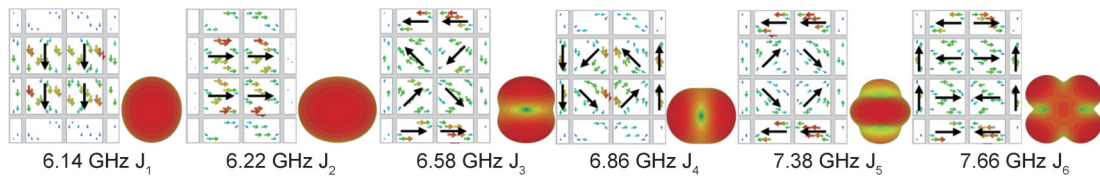
2.2 在 P2 加载 y 方向缝隙对超表面天线性能的影响

超表面 II 的结构如图 1(b) 所示, 对其进行特征模分析。图 6 为优化后超表面的 MS 曲线、模式 J_{S1}-J_{S4} 的特征电流和辐射方向图, 其中下标“S”表示加载缝隙后的模式。从图 6(a) 可见, 在 P2 上加载 y 方向的缝隙后, 由于模式 J_{S5} 和 J_{S6} 的电流路径缩短, 模式的谐振频率向高频方向移动, 移出了期望频带。由于接地层缝隙沿 x 方向, 主要激励的模式为 P1 上特征电流沿 y 方向的模式 J_{S1}、J_{S3} 和 J_{S4}。在 7.4 GHz 处, 基本模式 J_{S1} 的模式比重较大。从图 6(b) 可见, 模式 J_{S1} 的辐射图仍然保持宽侧辐射特性, 有利于提高天线在 7.4 GHz 处的增益。图 7 是初始天线和优化后天线在 7.4 GHz 处的辐射方向图对比。图 7(a) 是 E 面方向图对比, 优化后主瓣幅度从 3.4 dBi 提高到 7.28 dBi, 旁瓣电平降低 6 dB。图 7(b) 是 H 面的对比, 旁瓣电平降低 6.5 dB。证明在 P2 单元加载 y 方向缝隙确实可以提高超表面天线在 7.4 GHz 的增益。

图 8 是初始天线和优化后天线的 |S₁₁| 以及增益曲线对比。优化后的天线工作带宽为 4.89 GHz~7.41 GHz, 增益为 6.7 dBi~8.9 dBi 之间, 工作带宽内增益曲线波动范围在 2.2 dB 之间。可见优化后的天线在保持原有宽带特性的前提



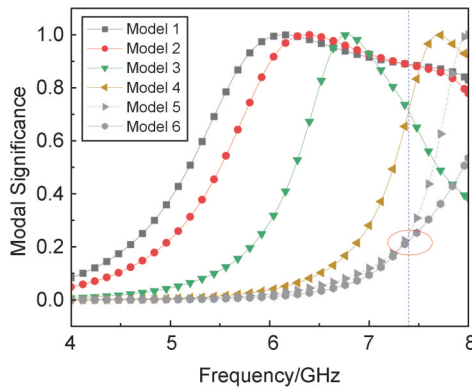
(a) 超表面 I 的模式重要性



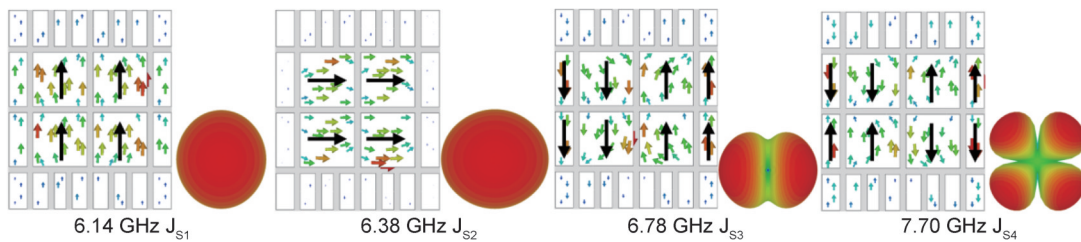
(b) 模式 J_1 - J_6 的特征电流和辐射方向图

图5 超表面 I 的特征模式

Fig. 5 Characteristic mode of MTS I



(a) 超表面 II 的模式重要性



(b) J_{S1} - J_{S4} 模式的特征电流和辐射方向图

图6 超表面 II 的特征模式

Fig. 6 The characteristic mode of MTS II

下,增益波动明显改善。

3 宽带超表面天线的测试结果与分析

图9是加工制作的天线实物。采用网络分析仪 Agilent N5230C 对天线的 $|S_{11}|$ 进行测试,图

10 是天线远场测试环境。图 11 是该天线的仿真和实测 $|S_{11}|$ 及增益对比,可以看出仿真和实测结果基本一致,该天线工作在 4.89 GHz~7.41 GHz 频段,相对带宽为 41%,带宽范围内增益非常平稳,为 6.7 dBi~8.9 dBi。图 12 是天线在

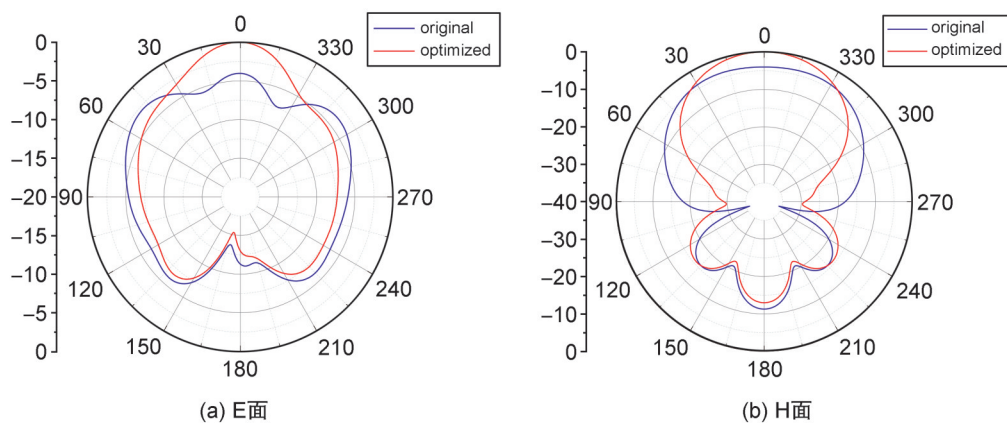


图7 初始天线和优化后天线在7.4 GHz处的辐射方向图

Fig. 7 The simulated radiation patterns of the original antenna and the optimized antenna at 7.4 GHz

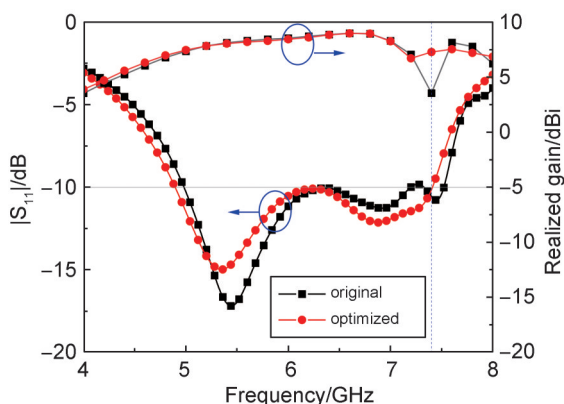


图8 初始天线和优化后天线反射系数和实际增益曲线

Fig. 8 The simulated $|S_{11}|$ and realized gain of the original antenna and the optimized antenna

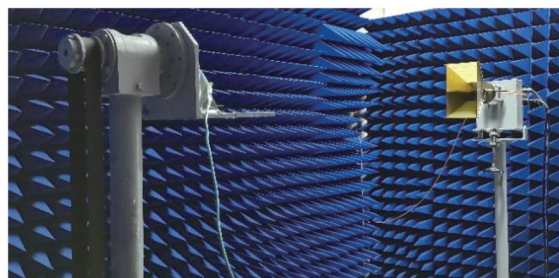
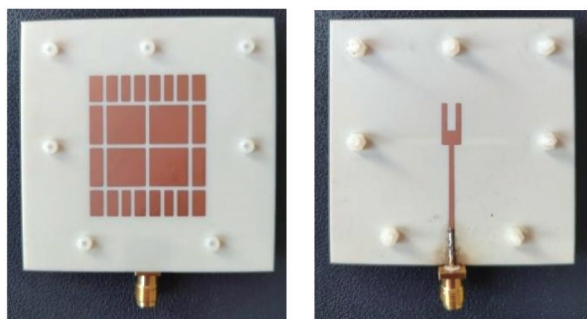


图10 天线远场测试环境

Fig. 10 Photograph of the antenna far-field measurement set-up



(a) 顶部 (b) 底部

图9 加工的天线照片

Fig. 9 The photo of the antenna

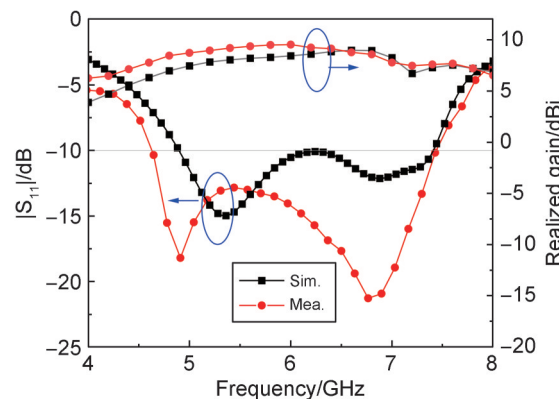


图11 优化后天线仿真和测试的S参数及实际增益

Fig. 11 Simulated and measured S-parameters and realized gain

6 GHz 和 7 GHz 的归一化辐射方向图。实测结果与模拟结果吻合较好。

表2比较了所提出的工作频带内增益波动小于2.2 dB的宽带超表面天线和先前报道的线极化超表面天线的性能。所提出的天线在相对较宽的阻抗带宽内实现了较小的增益波动。相

比文献[14],以相当的带宽和剖面,实现了较高的增益。

4 结论

本文提出并实验验证了一种工作频带内增益波动小于2.2 dB的宽带超表面天线。初始天线的上表面结构为4×4的非周期金属贴片,天线在7.4 GHz的增益仅为3.4 dBi,明显低于低频段的6.7 dBi~8.9 dBi。之后利用特征模分析

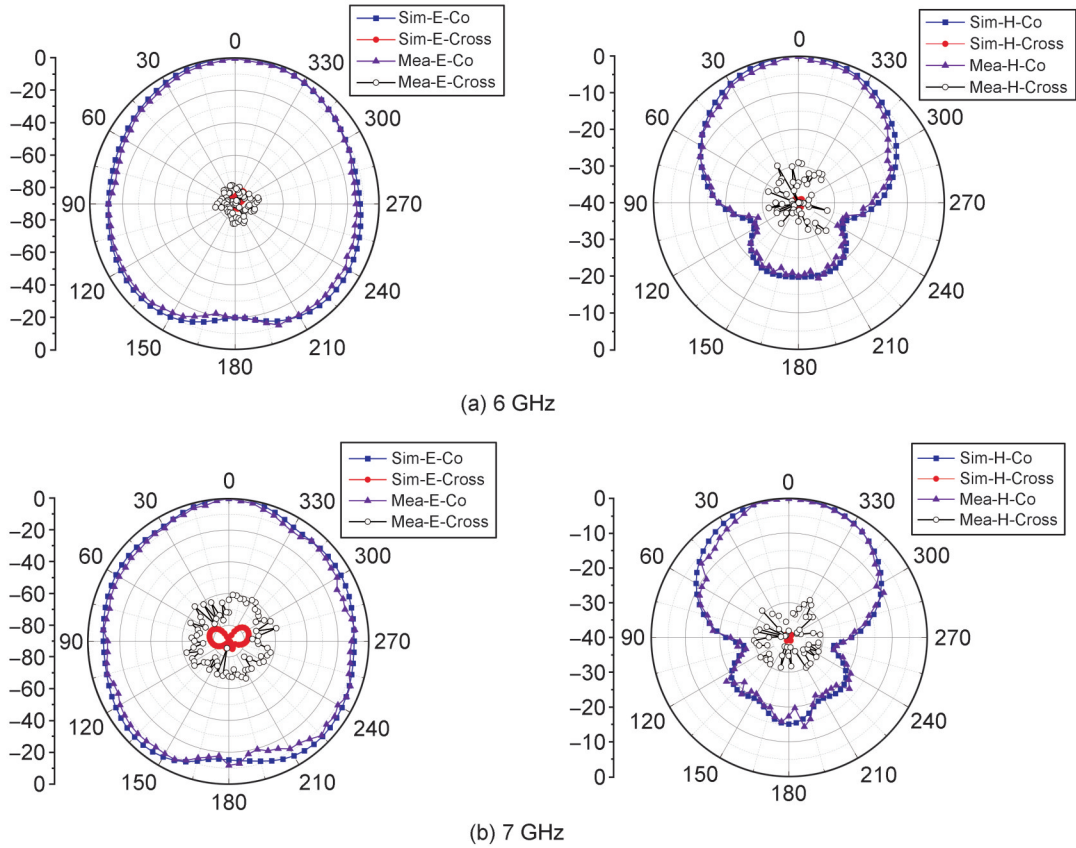


图 12 优化后天线仿真和测试的辐射方向图
 Fig. 12 Simulated and measured radiation patterns

表 2 天线测试结果与已报道的线极化超表面天线的比较

Table 2 Comparison to reported linear polarization MTS antenna

Ref.	Center Frequency/GHz	Bandwidth/%	Profile-to-Wavelength Ratio	Gain/dBi
[10]	28.4	16.0	0.02	6.5~10.1
[14]	6.6	41.4	0.06	5.0~6.6
[15]	5.6	16.6	0.06	0.5~1.8
[16]	29.7	30.3	0.10	5.3~6.2
[18]	5.5	20.2	0.07	6.4~8.1
[25]	5.9	6.5	0.06	6.0~11.5
This work	6.2	41.0	0.07	6.7~8.9

法,在P2单元加载y方向缝隙,抑制一部分具有高旁瓣的高阶模式,同时对宽侧辐射的基本模式不产生影响,从而提高天线在高频处的增益。优化后的天线阻抗带宽为4.89 GHz~7.41 GHz,相对带宽达到41%,7.4 GHz的增益从3.4 dBi提高到7.28 dBi,整个工作频带内增益为6.7 dBi~8.9 dBi。本文设计的天线覆盖了5.15 GHz~5.35 GHz的5 GHz无线局域网频段,以及可用于宽带无线接入、点对点传输、电子不停车收费等无线通信系统的5.8 GHz,车联网5.9 GHz等频段,应用场景十分广泛。

参考文献:

[1] NIE N S, YANG X S, CHEN Z N, *et al.* A Low-profile Wideband Hybrid Metasurface Antenna Array for 5G and WiFi Systems[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2020, **68**(2): 665-671. DOI: 10.1109/TAP.2019.2940367.
 [2] HARRINGTON R, MAUTZ J. Computation of Characteristic Modes for Conducting Bodies[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 1971, **19**(5): 629-639. DOI: 10.1109/TAP.1971.1139990.
 [3] HARRINGTON R, MAUTZ J. Theory of Characteristic Modes for Conducting Bodies[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 1971, **19**(5): 622-628. DOI: 10.1109/

- TAP.1971.1139999.
- [4] CABEDO-FABRES M, ANTONINO-DAVIU E, VALERO-NOGUEIRA A, *et al.* The Theory of Characteristic Modes Revisited: A Contribution to the Design of Antennas for Modern Applications[J]. *IEEE Antennas Propag Mag*, 2007, 49(5): 52–68. DOI: 10.1109/MAP.2007.4395295.
- [5] 李瑞金, 李凯丽, 罗杰, 等. 基于超表面的双频双波束端射天线[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2023, 46(2): 375–380. DOI: 10.13451/j.sxu.ns.2022027.
- LI R J, LI K L, LUO J, *et al.* End-fired Antenna with Dual Band and Dual Beam Based on Metasurface[J]. *J Shanxi Univ Nat Sci Ed*, 2023, 46(2): 375–380. DOI: 10.13451/j.sxu.ns.2022027.
- [6] 王璐, 陈新伟. 基于超表面的宽带滤波天线设计[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2024, 47(5): 1062–1067. DOI: 10.13451/j.sxu.ns.2023096.
- WANG L, CHEN X W. Design of Wideband Filtering Antenna Based on Metasurface[J]. *J Shanxi Univ Nat Sci Ed*, 2024, 47(5): 1062–1067. DOI: 10.13451/j.sxu.ns.2023096.
- [7] 卢颖娟, 程强, 王思然, 等. 用于波束重构和雷达截面缩减的超宽带可重构智能超表面设计(特邀)[J]. 光学学报(网络版), 2025, 2(4): 4–12. DOI: 10.3788/AOSOL240456.
- LU Y J, CHENG Q, WANG S R, *et al.* Ultra-wideband Reconfigurable Intelligent Metasurface Design for Beam Reshaping and Radar Cross Section Reduction(Invited) [J]. *Acta Opt Sin Online*, 2025, 2(4): 4–12. DOI: 10.3788/AOSOL240456.
- [8] LIN F H, CHEN Z N. A Method of Suppressing Higher Order Modes for Improving Radiation Performance of Metasurface Multiport Antennas Using Characteristic Mode Analysis[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2018, 66(4): 1894–1902. DOI: 10.1109/TAP.2018.2806401.
- [9] LIN F H, CHEN Z N. Low-profile Wideband Metasurface Antennas Using Characteristic Mode Analysis[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2017, 65(4): 1706–1713. DOI: 10.1109/TAP.2017.2671036.
- [10] XUE M, WAN W K, WANG Q D, *et al.* Low-profile Millimeter-wave Broadband Metasurface Antenna with Four Resonances[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2021, 20(4): 463–467. DOI: 10.1109/LAWP.2021.3053589.
- [11] DE DIEU NTAWANGAHEZA J, SUN L G, XIE Z P, *et al.* A Single-layer Low-profile Broadband Metasurface Antenna Array for Sub-6 GHz 5G Communication Systems[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2021, 69(4): 2061–2071. DOI: 10.1109/TAP.2020.3027042.
- [12] YU J B, LI H. Characteristic Mode Aided Design of Handset Antennas with High Isolations[C]//2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). New York: IEEE, 2023: 1–2. DOI: 10.1109/ISAP57493.2023.10389005.
- [13] DENG Y Z, YANG N, LU K, *et al.* Characteristic Mode Cancellation for Radiation Pattern Decoupling of Asymmetric Dipole Antennas[C]//2024 Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference (CSRSWTC). New York: IEEE, 2024: 1–3. DOI: 10.1109/CSRSWTC64338.2024.10811481.
- [14] CHEN D X, YANG W C, XUE Q, *et al.* Miniaturized Wideband Planar Antenna Using Interembedded Metasurface Structure[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2021, 69(5): 3021–3026. DOI: 10.1109/TAP.2020.3028245.
- [15] YANG X, LIU Y, GONG S X. Design of a Wideband Omnidirectional Antenna with Characteristic Mode Analysis[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2018, 17(6): 993–997. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2828883.
- [16] TANG J J, ZHAO H L, SONG L. Design of a Broadband Omnidirectional Metasurface Antenna Using Characteristic Mode Analysis[C]//2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS-Spring). New York: IEEE, 2019: 2424–2429. DOI: 10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017244.
- [17] YANG W C, HUANG J, CHEN D X, *et al.* Broadband Dual-polarized Filtering Metasurface-based Antennas Using Characteristic Mode Analysis for 5G Millimeter-wave Applications[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2024, 72(5): 3912–3927. DOI: 10.1109/TAP.2024.3377918.
- [18] WU D, SUN Y X, LIAN R N, *et al.* Metasurface Antenna with Cocircularly Polarized Radiation Characteristics for Wideband Monostatic Simultaneous Transmit and Receive Applications[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2023, 71(4): 3304–3313. DOI: 10.1109/TAP.2023.3243988.
- [19] LIN F H, CHEN Z N. Resonant Metasurface Antennas with Resonant Apertures: Characteristic Mode Analysis and Dual-polarized Broadband Low-profile Design[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2021, 69(6): 3512–3516. DOI: 10.1109/TAP.2020.3028246.
- [20] LIU J F, WENG Z B, ZHANG Z Q, *et al.* A Wideband Pattern Diversity Antenna with a Low Profile Based on Metasurface[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2021, 20(3): 303–307. DOI: 10.1109/LAWP.2020.3048633.
- [21] HAN L P, LI Z, HAN G R, *et al.* Wideband Metasurface Antenna Using Characteristic Mode Analysis[C]//2021 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). New York: IEEE,

- 2021: 1–3. DOI: 10.1109/ICMMT52847.2021.9618099.
- [22] LIU P, JIANG W, SUN S Y, *et al.* Broadband and Low-profile Penta-polarization Reconfigurable Metamaterial Antenna[J]. *IEEE Access*, 2020, **8**: 21823–21831. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2969488.
- [23] 刘亚昆, 贾丹, 杜彪. 基于特征模理论的微带天线双线性极化 RCS 缩减设计[J]. *现代雷达*, 2021, **43**(5): 73–79. DOI: 10.16592/j.cnki.1004-7859.2021.05.012.
- LIU Y K, JIA D, DU B. Dual-linear Polarization RCS Reduction for Microstrip Antenna Based on Characteristic Mode Theory[J]. *Mod Radar*, 2021, **43**(5): 73–79. DOI: 10.16592/j.cnki.1004-7859.2021.05.012.
- [24] 史恒基, 韩丽萍. 基于超表面的极化可重构天线设计[J]. *山西大学学报(自然科学版)*, 2023, **46**(4): 856–862. DOI: 10.13451/j.sxu.ns.2022051.
- SHI H J, HAN L P. Design of Polarization Reconfigurable Antenna Based on Metasurface[J]. *J Shanxi Univ Nat Sci Ed*, 2023, **46**(4): 856–862. DOI: 10.13451/j.sxu.ns.2022051.
- [25] NAIK D K, CHARAN PANDA D, SWAIN R, *et al.* Pac-man-shaped Patch-driven Broadband Circularly Polarized Metasurface Antenna with CMA-based Quadruple-mode Excitation[J]. *IEEE Access*, 2025, **13**: 13644–13654.
- [26] CHEN D X, YANG W C, CHE W Q, *et al.* Broadband Stable-gain Multiresonance Antenna Using Nonperiodic Square-ring Metasurface[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2019, **18**(8): 1537–1541. DOI: 10.1109/LAWP.2019.2919692.
- [27] WANG K, SHAO W, DING X, *et al.* Design of High-gain Metasurface Antenna Based on Characteristic Mode Analysis[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2022, **21**(4): 661–665. DOI: 10.1109/LAWP.2022.3140326.
- [28] LUO Y, ZHU L, LIU Y, *et al.* Efficiency Improvement of Smartphone Antennas Using Higher-order Mode Suppression Under Characteristic Mode Analysis[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2022, **70**(11): 10304–10317. DOI: 10.1109/TAP.2022.3195537.
- [29] QIU Y H, WENG Z B, ZHANG Z Q, *et al.* A Dielectric Resonator Fed Wideband Metasurface Antenna with Radiation Pattern Restoration Under Its High Order Modes[J]. *IEEE Access*, 2020, **8**: 217671–217680. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3041628.
- [30] FENG C X, YANG Z, LIU H L, *et al.* Design of a Flat Gain Broadband Metasurface Antennas Using Characteristic Mode Analysis[C]//2023 Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference (CSRSWTC). New York: IEEE, 2023: 1–3. DOI: 10.1109/CSRSWTC60855.2023.10427420.