

文章编号: 1671-7449(2025)01-0033-08

基于人工磁导体的低剖面高增益宽带天线

苏晋荣¹, 王嘉勇², 药春晖³, 陈新伟¹

(1. 山西大学 物理电子工程学院, 山西 太原 030006; 2. 航天新气象科技有限公司, 江苏 无锡 214000;
3. 北方自动控制技术研究所, 山西 太原 030006)

摘要: 提出一种基于人工磁导体 (Artificial Magnetic Conductor, AMC) 的高增益宽带天线, 该天线由一个 AMC 超表面和一个微带贴片天线组成。利用 AMC 的同相反射特性, 将天线的后向辐射反射与前向辐射叠加, 从而提升了天线的增益。天线的整体尺寸为 $0.6\lambda_0 \times 0.6\lambda_0 \times 0.12\lambda_0$ (λ_0 为天线谐振频率对应的波长)。测试结果表明, 在 4.55~6.1 GHz (27.7%) 的工作频段内, 天线的峰值增益达到 8.4 dB。与利用理想电导体 (Perfect Electric Conductor, PEC) 提升增益的方法相比, 其剖面从 $0.37\lambda_0$ 降低到 $0.12\lambda_0$ 。该天线剖面低、尺寸小、增益高、成本低廉, 可以应用于 WLAN 波段通信。

关键词: 人工磁导体; 同相反射; 低剖面; 高增益

中图分类号: TN822

文献标识码: A

doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025006

引用格式: 苏晋荣, 王嘉勇, 药春晖, 等. 基于人工磁导体的低剖面高增益宽带天线[J]. 测试技术学报, 2025, 39(1): 33-40.

SU Jinrong, WANG Jiayong, YAO Chunhui, et al. A low-profile high-gain broadband antenna based on AMC [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(1): 33-40.

A Low-Profile High-Gain Broadband Antenna Based on AMC

SU Jinrong¹, WANG Jiayong², YAO Chunhui³, CHEN Xinwei¹

(1. School of Physics and Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;
2. Aerospace New Weather Technology Co., Ltd., Wuxi 214000, China;
3. Northern Automatic Control Technology Research Institute, Taiyuan 030006, China)

Abstract: A high-gain broadband antenna based on artificial magnetic conductor metasurface (AMC-MS) is proposed. The antenna is composed of an AMC-MS and a microstrip patch antenna. By using the in-phase reflection characteristic of the AMC-MS, the backward radiation of the antenna is reflected and superimposed with the forward radiation, thus improving the gain. The overall size of the antenna is $0.6\lambda_0 \times 0.6\lambda_0 \times 0.12\lambda_0$ (λ_0 represents the wavelength corresponding to the resonant frequency). Experimental results demonstrate that within the frequency range of 4.55~6.1 GHz (27.7%), the peak gain of the antenna is 8.4 dB. Compared to the method of using perfect electric conductor (PEC) to enhance the gain, the profile is reduced from $0.37\lambda_0$ to $0.12\lambda_0$. The excellent performance including low profile, small size, high gain, and low cost makes it a potential candidate for the application of WLAN communication.

Key words: artificial magnetic conductor (AMC); in-phase reflection; low profile; high gain

收稿日期: 2024-03-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62071282); 山西省基础研究计划资助项目(202203021211295)

作者简介: 苏晋荣(1981-), 女, 副教授, 博士, 主要从事微波器件研究。E-mail: sujinqing@sxu.edu.cn.

0 引言

随着无线通信技术的发展,信息传输距离越来越远,如卫星通信、微波远程传输以及深空探测等,为了实现远距离传输,天线需要具有较高增益^[1-2]。提升天线增益的传统方法有设计周期漏波结构,引入渐变辐射单元和设计新型的馈电网络等^[3-5]。例如,Shaw等^[3]设计了一种背向辐射的周期漏波天线,在12 GHz处天线的峰值增益达到12.7 dBi;Chen等^[4]采用柔性印刷板和Vivaldi天线组成二元阵列天线,并使用T型馈电网络提供同相等幅的激励,在3~9 GHz频段内增益最高达15.58 dBi。上述天线增益高但尺寸较大。为减小尺寸,Cao等^[5]设计了一款双端口馈电网络,以较小的尺寸实现了9.7 dBi的增益,然而这种方法馈电网络复杂,设计工作难度大。因此,如何在保持小型化、设计加工难度小的同时实现高增益依然是值得探索的问题。

超表面是一种由准二维平面亚波长人工材料组成的周期结构,可对电磁波的幅度、相位和极化方式等灵活调控,为学者们提升天线增益提供了新的思路^[6-7]。其中,AMC-MS(Artificial Magnetic Conductor Metasurface)具有同相反射特性,不少学者利用该特性提升天线增益^[8]。例如,Khang等^[9]利用AMC-MS作为天线的侧壁来调节电磁波波束的汇聚方向,在30°方向上天线的峰值增益达到12.6 dB;Fakhte等^[10]使用AMC-MS和频率选择表面与天线组成谐振腔,在7.7~9.3 GHz频段内峰值增益达到16 dB,其整体高度为0.35 λ_0 。将AMC-MS放置在天线下方,同相反射与前向辐射叠加,可使增益得到显著提升,且其剖面均小于1/4 λ_0 ,但平面尺寸有待进一步小型化^[11-16]。由于天线各性能之间相互制约,如何用简单、紧凑的结构同时获得高增益、宽频带等综合性能的提升始终是设计人员所追求的共同目标。

本文提出一款剖面低、尺寸小巧的高增益宽带天线,该天线由一个共面波导馈电的微带贴片天线和一个与天线尺寸相同的AMC-MS组成。将AMC-MS置于天线下方,利用其同相反射特性,将天线的后向辐射反射与前向辐射叠加,从而提升了天线的增益。与当前文献报道的工作相比,本文提出的天线不但剖面低,而且平面尺寸更小。

1 贴片天线设计

本文采用铲形贴片天线作为所设计高增益天线的馈源,如图1所示。天线的介质基板为FR4($\epsilon_r=4.4$, $\tan\delta=0.02$),厚度为1 mm,采用共面波导馈电来减小天线的尺寸。为改善天线的阻抗匹配,在辐射贴片的上半部分和馈线上方分别蚀刻了一个“U”型槽和“C”型槽。优化后的天线几何参数如表1所示。

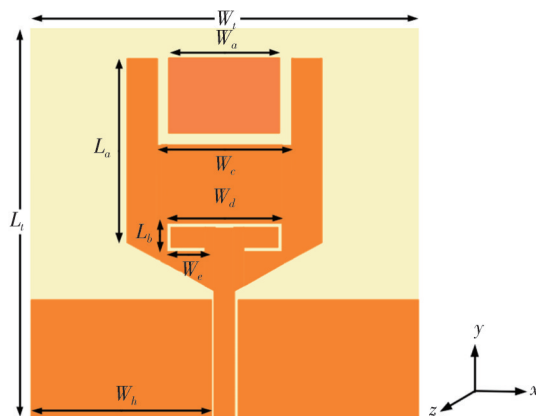


图1 贴片天线示意图

Fig. 1 Schematic of the patch antenna

表1 天线的几何参数

Tab. 1 Dimensions of the antenna

参数	W_t	L_t	W_a	W_c	W_e
取值/mm	40	40	11.4	5	0.9
参数	W_d	W_h	L_a	L_b	
取值/mm	12	18.6	19	3	

图2给出了天线的设计过程以及相应的反射系数和电流分布图。天线I是最初的方形贴片天线,电流主要集中在矩形贴片的下边缘和地面的上边缘,由于电流方向相反,天线辐射较弱。为改善天线谐振特性,对天线I底部切角得到天线II,切角改变了贴片的电流方向,在5.36 GHz处产生了明显的谐振。为进一步增强谐振,在贴片顶部蚀刻“U”型槽形成天线III,“U”型槽将辐射贴片上半部分的电流集中在侧边缘,将谐振点处 $|S_{11}|$ 降低至20 dB以下。最后,为了将截止频率移动到4.5 GHz左右,在天线III贴片底部附近蚀刻一个开口向下的“C”型槽,得到最终的天线。图2(d)中,电流集中在“C”型槽和馈线周围,反向电流产生的辐射电场相互抵消,从而削弱天线的辐射形成陷波,最终得到4.55~5.95 GHz的工作频带,谐振频率为5.4 GHz。

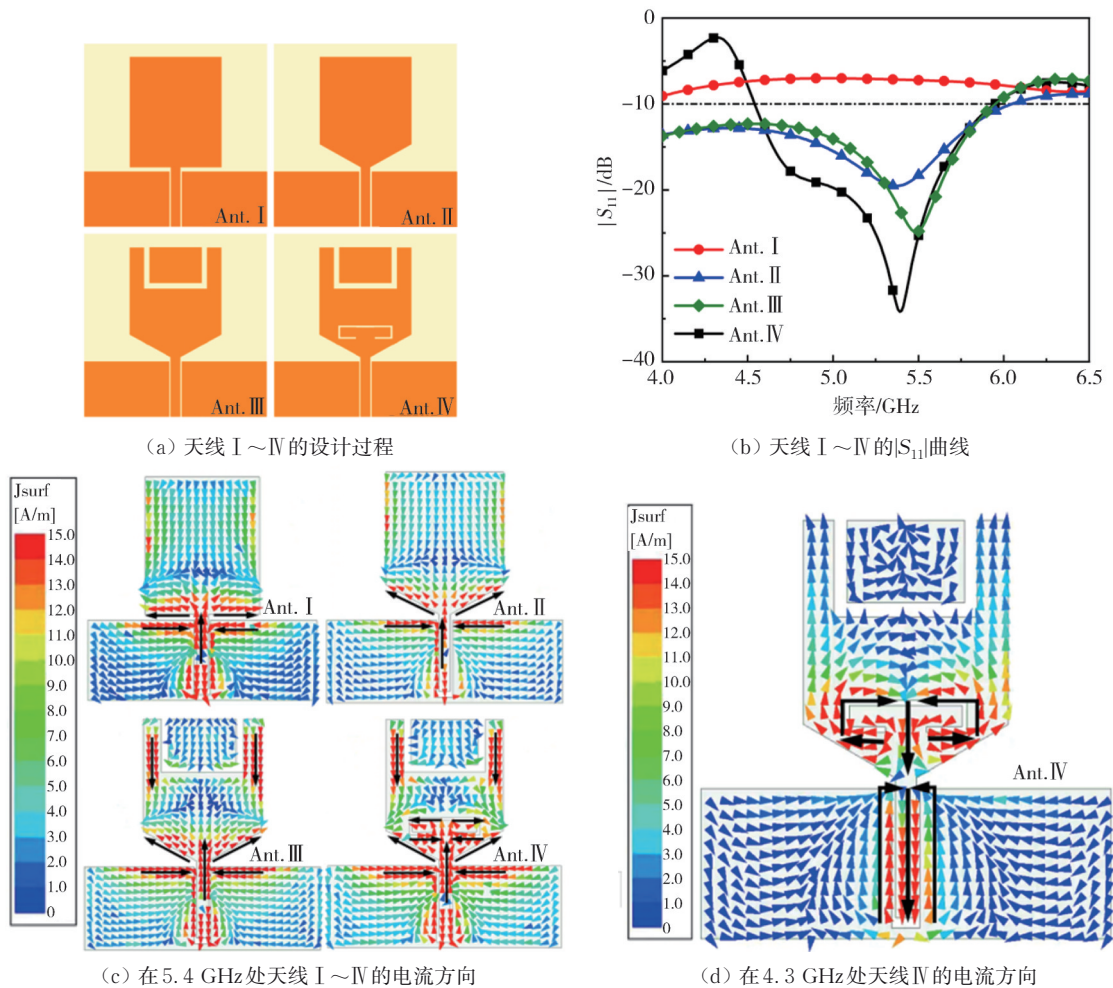


图 2 天线的设计过程以及相应的 $|S_{11}|$ 曲线和电流分布

Fig. 2 Evolution of antenna, corresponding $|S_{11}|$ curves and current distributions

图 3 为天线 IV 的 $|S_{11}|$ 和增益仿真结果,可以看出在 4.55~5.95 GHz(26%)的工作频段内天线的增益大于 0.5 dB, 在 5 GHz 增益达到最大值 2.5 dB。从 5.2 GHz 开始,其增益随频率升高而逐渐下降至 0 dB 以下,无法满足高增益天线的应用需求。为提升天线增益,下面设计 AMC 结构并探讨其对天线增益的提升作用。

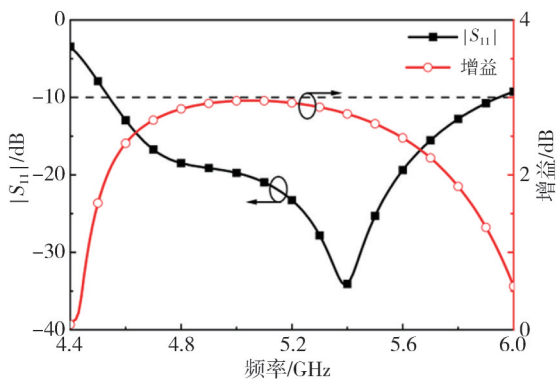


Fig. 3 $|S_{11}|$ and gain of the patch antenna

2 AMC 单元设计

图 4 为所提出 AMC 单元的结构。该 AMC 单元由 4 层介质基板组成,每层基板的上表面由 6 个尺寸相同、方向不同的“箭头”形贴片组成,在最底层基板背面涂覆金属铜。采用 FR4 材料作为介质基板,每层介质基板的厚度相同,均为 1 mm。AMC 单元的其余参数为: $W_1=3.5$ mm, $W_2=1.8$ mm, $W_3=1.5$ mm, $H_1=1$ mm。

利用电磁仿真软件 HFSS 仿真该 AMC-MS 的反射相位特性,采用周期边界条件和 Floquet 端口,如图 5(a) 所示。图 5(b) 为仿真得到的 AMC-MS 的反射系数的幅值与相位。一般情况下,同相反射带宽定义为相位在 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 之间的频段。可以看出,所提出的 AMC-MS 的同相反射带宽为 4.4~6.37 GHz, 相对带宽 36.5%, 零反射相位对应的频率位于 5.4 GHz 处, 反射系数幅值在 0.85

以上,基本呈现全反射特性。

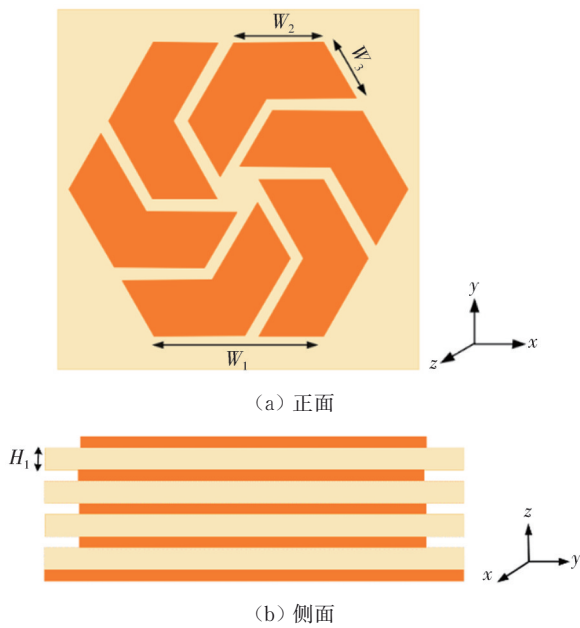
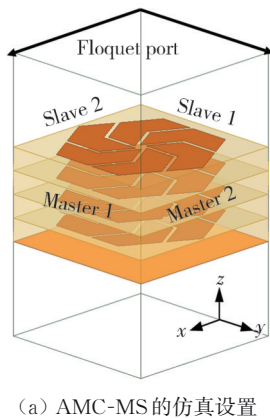


图4 AMC单元示意图
Fig. 4 Schematic of AMC cell



(a) AMC-MS的仿真设置

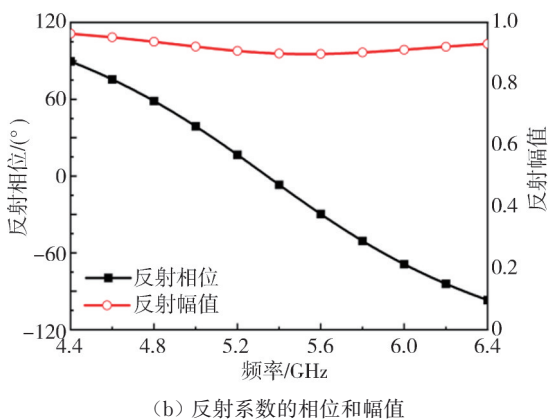


图5 AMC-MS的仿真设置以及反射系数的幅值与相位曲线
Fig. 5 Simulation settings and the magnitude and phase of the AMC-MS reflection coefficient

3 加载 AMC-MS 的天线性能仿真与分析

为了提升天线增益,将 AMC 单元组成 5×5 的超表面,并置于上述所设计的贴片天线下方,如图 6 所示。超表面尺寸与天线尺寸相同,也为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 。每列 AMC 单元之间的距离 g 为 1 mm ,每行 AMC 单元之间的距离 s 为 2 mm 。经过参数优化后,AMC-MS 与天线之间的距离 H_2 为 3.5 mm ,天线整体高度为 8.5 mm 。

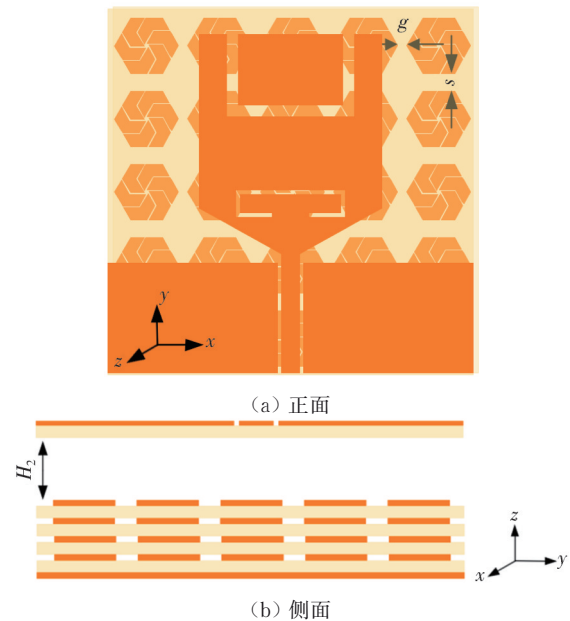


图6 加载 AMC-MS 的天线结构示意图

Fig. 6 Schematic of antenna with AMC-MS

图 7 给出了加载 AMC-MS 前后天线的 $|S_{11}|$ 结果对比,可以看出,加载 AMC-MS 后,天线的工作带宽略有扩展,由 $4.55 \sim 5.95 \text{ GHz}$ (26%) 增加为 $4.55 \sim 6.1 \text{ GHz}$ (27.7%)。

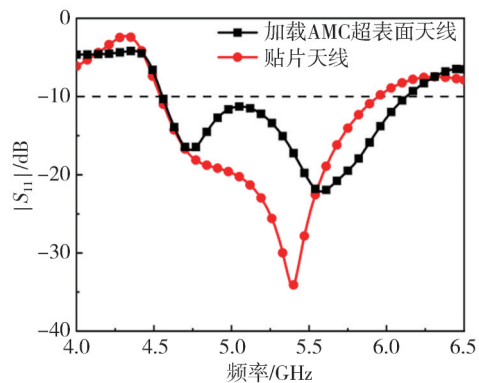


图7 加载 AMC-MS 前后天线的 $|S_{11}|$ 曲线

Fig. 7 Comparison of $|S_{11}|$ with and without AMC-MS

图 8 为加载 AMC-MS 前后天线的增益对比。可以看出,加载 AMC-MS 后,在 4.55~6.1 GHz 内天线的增益均大于 6 dB,具有较好的平坦度,3 dB 增益相对带宽约为 26.7%,在 5.6 GHz 时具有最大增益 8.4 dB。与未加载 AMC-MS 时相比,增益平均提高了约 6 dB。

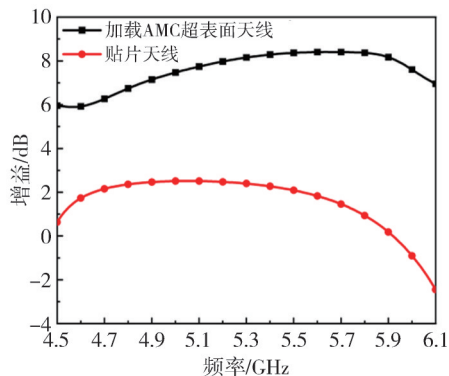


图 8 加载 AMC-MS 前后天线的增益对比

Fig. 8 Comparison of gain with and without AMC-MS

图 9 为在 2 个谐振点 4.76 GHz 和 5.58 GHz 处加载 AMC-MS 前后天线的辐射方向图对比。可以看出,在加载 AMC-MS 后,天线的后向辐射明显减小,前向辐射得到显著提高。

为了验证该 AMC-MS 能起到降低天线剖面的作用,将加载 AMC-MS 的天线与加载理想电导体 (Perfect Electric Conductor, PEC) 的天线进行了比较。PEC 和 AMC-MS 的尺寸同为 40 mm × 40 mm。 $|S_{11}|$ 和增益的对比如图 10 所示。可以看出,在与 AMC 相同的位置 ($0.12 \lambda_0$) 放置 PEC 表面时,天线的 -10 dB 阻抗带宽远小于加载 AMC-MS 时的阻抗带宽,且其高频处的增益有所下降。将 PEC 与天线的距离增加至使天线总高度为 $0.37 \lambda_0$ 时,其带宽才与加载 AMC 表面的相同,同时,其高频段的增益依然低于加载 AMC 表面的。由此可见,所设计的 AMC-MS 可以在降低天线剖面的同时保持较好的带宽和增益。

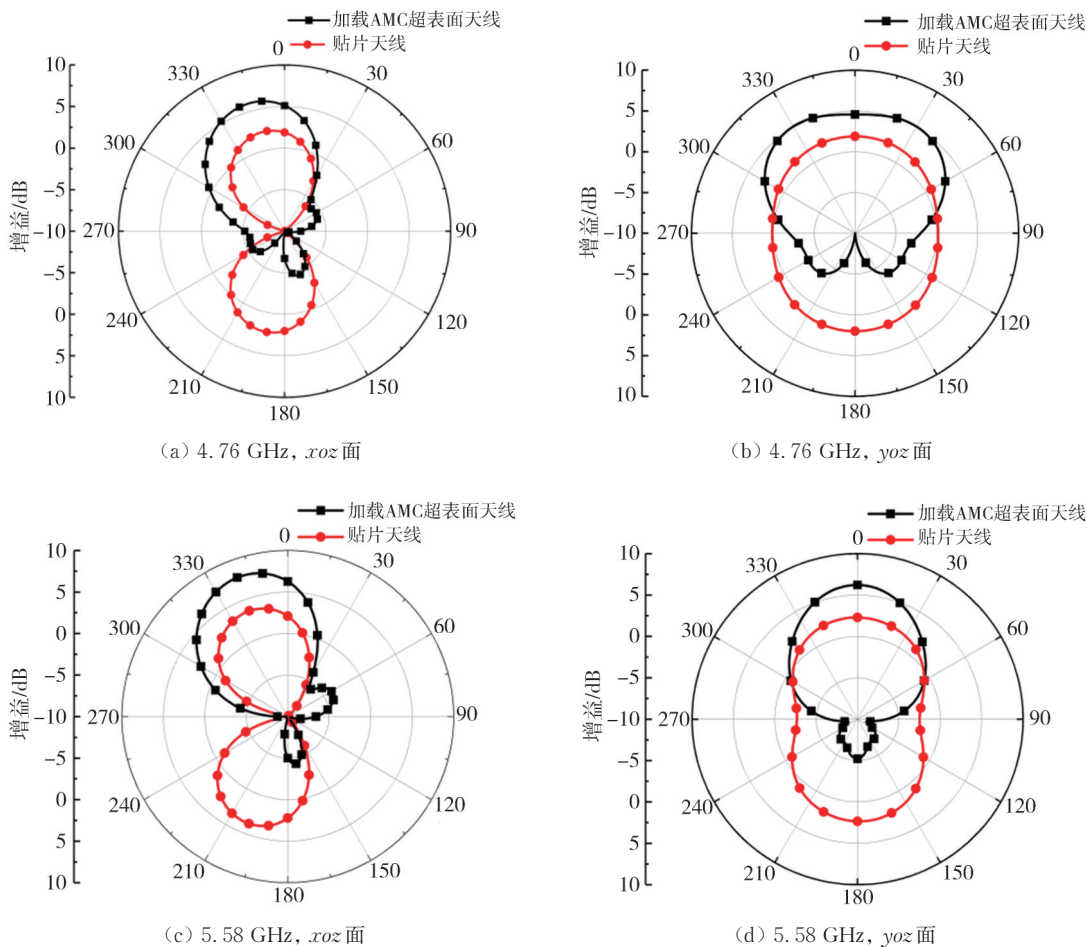
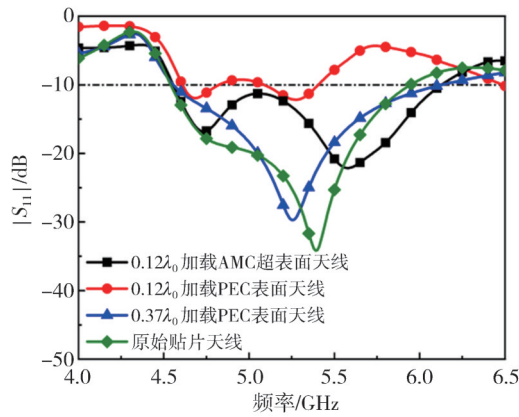
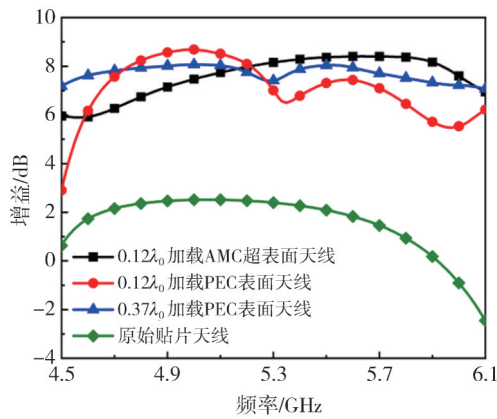


图 9 加载 AMC-MS 前后, 4.76 GHz 和 5.58 GHz 处天线的辐射方向图对比

Fig. 9 Comparison of radiation pattern with and without AMC-MS at 4.76 GHz and 5.58 GHz



(a) $|S_{11}|$



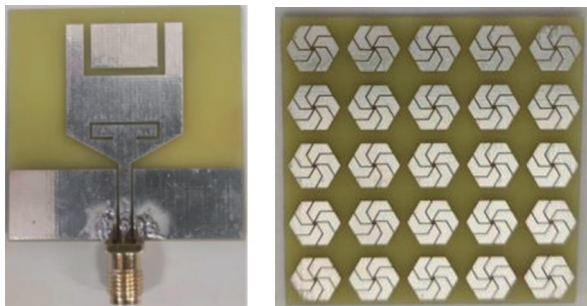
(b) 增益

图 10 分别加载 AMC-MS 和 PEC 表面时天线的 $|S_{11}|$ 和增益

Fig. 10 $|S_{11}|$ and gain with AMC-MS or PEC surface

4 实验验证

为验证仿真结果的准确性，将设计的超表面高增益天线进行加工，实物如图 11 所示。利用矢量网络分析仪 Agilent N5222A 测量了天线的 S 参数，得到的 $|S_{11}|$ 曲线如图 12 所示。可以看出，测试得到的天线工作带宽为 4.45~6.3 GHz，中心频率为 5.74 GHz，略高于仿真结果。



(a) 天线正面

(b) 超表面正面

图 11 加载 AMC-MS 天线的实物

Fig. 11 The fabricated antenna with AMC-MS

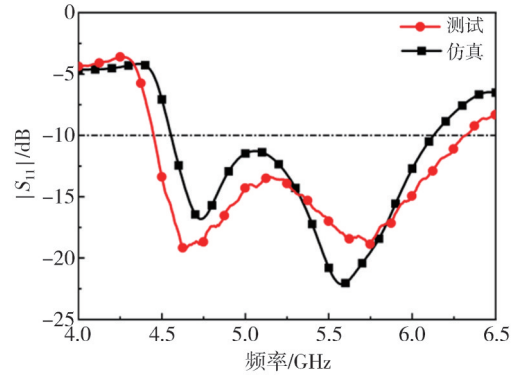
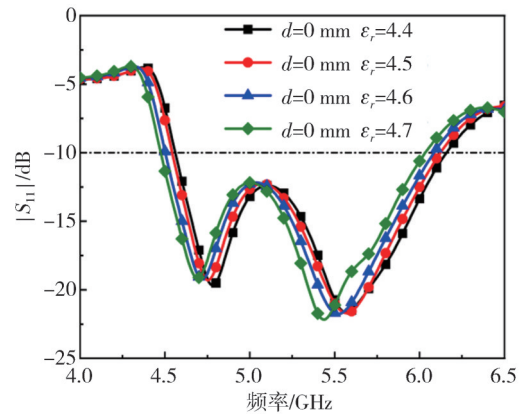


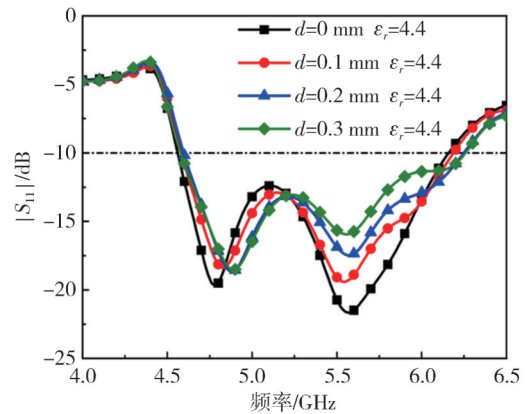
图 12 仿真与实测的 $|S_{11}|$ 对比

Fig. 12 Comparison of measured and simulated $|S_{11}|$

为探究误差原因，对构成超表面介质基板的介电常数以及每层基板间的空隙 d 进行了参数分析，得到天线的 $|S_{11}|$ 曲线如图 13 所示。



(a) 介质基板的介电常数对 $|S_{11}|$ 的影响



(b) 每层基板间的空隙 d 对 $|S_{11}|$ 的影响

图 13 介质基板的介电常数和每层基板间的空隙 d 对 $|S_{11}|$ 的影响

Fig. 13 Impact of relative permittivity and the gap between each substrate layer on $|S_{11}|$

可以看出，随着介电常数的增加，天线低频截止频率向下偏移；随着板间的空隙变大，天线高频截止频率向上偏移，二者共同作用会导致测

试带宽大于仿真带宽。这些误差在实际加工中难以避免,但不影响对本文所设计天线性能的验证。

此外,在微波暗室中测量了天线的辐射模式,得到的增益和在 4.76 GHz 和 5.58 GHz 处的辐射方向图分别如图 14 和图 15 所示。测试得到天线的最大增益为 8.75 dB,并且具有良好的增益平坦度。增益及辐射方向图与仿真结果具有较好的一致性,验证了所设计天线的性能。

为体现该设计的优势,表 2 给出了本文所设计天线与部分引入 AMC-MS 的参考文献中天线的性能对比。可以看出,本文设计的天线不仅剖面较低,其平面尺寸也远小于文献[9-15]中报道的天线。尽管文献[16]报道的天线具有更大的带宽,但在小型

化、最大增益和成本方面,本文的天线更有优势。

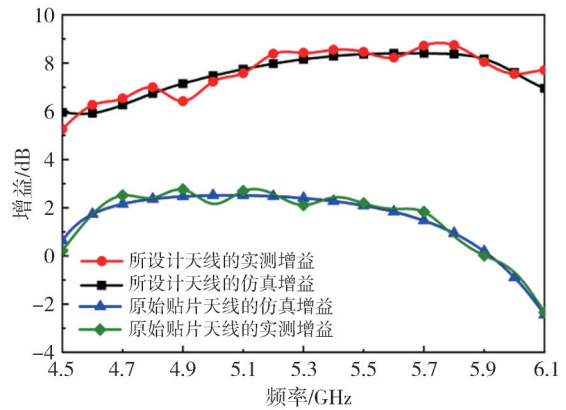


图 14 仿真与实测的增益对比

Fig. 14 Comparison of measured and simulated gain

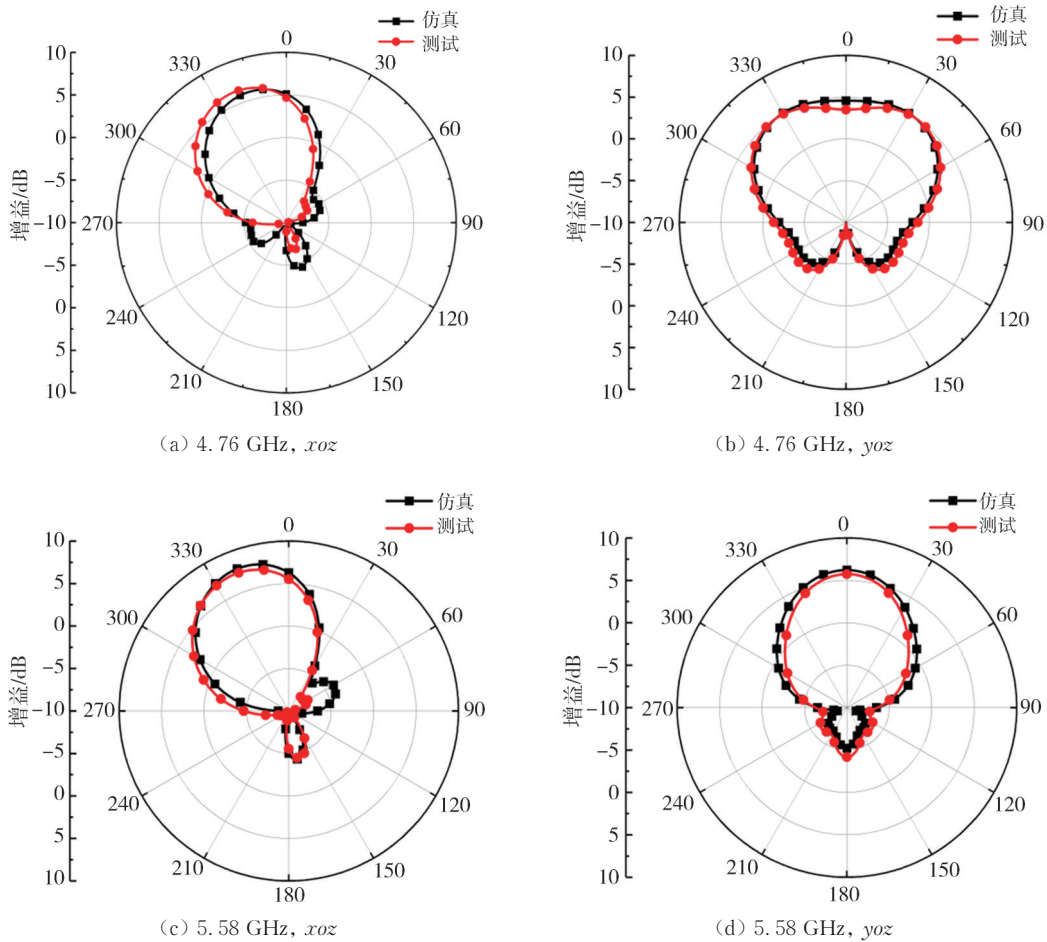


图 15 在 4.76 GHz 和 5.58 GHz 处辐射方向图的仿真与实测对比

Fig. 15 Comparison of measured and simulated radiation patterns at 4.76 GHz and 5.58 GHz

5 结 语

本文提出了一种采用 4 层介质基板形成的 AMC-MS, 将其放置在贴片天线下方, 用与天线

尺寸相同的超表面面积获得了增益的提升。天线整体尺寸为 $0.6 \lambda_0 \times 0.6 \lambda_0 \times 0.12 \lambda_0$, 阻抗带宽为 4.55~6.1 GHz (27.7%), 峰值增益达到 8.4 dB。该天线综合性能优良, 成本低廉, 可以应用于 WLAN 波段通信。

表2 天线性能对比

Tab. 2 Performance comparison of antennas

文献	尺寸/ λ_0^3	中心频率/GHz	相对带宽/GHz	峰值增益/dB	最大增益提升/dB	材料
[9]	$3.0 \times 1.7 \times 0.6$	4.8	4.55~5.56 (20%)	12.6	—	Taconic RF-35
[10]	$3.32 \times 3.32 \times 0.35$	8.3	7.7~9.3 (20%)	16	—	—
[11]	$1.47 \times 1.47 \times 0.25$	2.2	1.7~2.7 (46%)	6.3	3.6	FR4
[12]	$3.12 \times 0.82 \times 0.12$	1.93	1.83~2.72 (46.1%)	15.5	6	FR4/Rogers RT
[13]	$1.12 \times 1.12 \times 0.09$	5.62	4.83~6.25 (25.6%)	6	—	Rogers RO4360G2
[14]	$1.2 \times 1.2 \times 0.12$	6	4.67~6.99 (39.8%)	9.9	6	—
[15]	$1.5 \times 1.5 \times 0.063$	2.46	2.4~2.48 (5%)	10.3	3	Rogers RO4003
[16]	$0.87 \times 0.87 \times 0.19$	3.7	3.0~4.1 (31%)	7.1	—	Rogers4350
本文	$0.6 \times 0.6 \times 0.12$	5.58	4.55~6.1(27.7%)	8.4	8	FR4

参考文献:

- [1] YANG D, WAN M, LIU S. A metasurface antenna with the characteristic of broadband and stable high gain [C]//2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI), 2021: 63-64.
- [2] NI C, LIU C, WANG H, et al. A low-profile broadband and high-gain antenna based on metasurface [C]//2022 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), 2022: 1-3.
- [3] SHAW R, MANDAL M K. Backfire microstrip leaky-wave antenna with reduced sidelobe and low cross polarization [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(6): 1218-1222.
- [4] CHEN Y, HE Y, LI W, et al. A 3-9 GHz UWB high-gain conformal end-fire Vivaldi antenna array [C]//2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI), 2021: 737-738.
- [5] CAO C, GUO C. A wideband high-gain LHCP/RHCP patch antenna based on mirror feed method [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(12): 2317-2321.
- [6] SHRAVYA P, SINGH A K, DASARI R K, et al. Design of ultrathin metasurface lens for gain enhancement of microstrip patch antenna [C]//2021 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP), 2021: 883-886.
- [7] 罗杰, 张文梅. 基于双谐振环超表面的双波束天线 [J]. 测试技术学报, 2020, 34(2): 163-168.
LUO Jie, ZHANG Wenmei. A dual-beam antenna using metasurface of double resonant ring [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2020, 34(2): 163-168. (in Chinese)
- [8] ZHAI H, ZHANG K, YANG S, et al. A low-profile dual-band dual-polarized antenna with an AMC surface for WLAN applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2692-2695.
- [9] KHANG G G, KIM S J, KIM D. High-gain fabry-perot cavity antenna with an artificial magnetic conductor side wall [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(9): 2245-2249.
- [10] FAKHTE R, ARYANIAN I. Compact fabry-perot antenna with wide 3 dB axial ratio bandwidth based on FSS and AMC structures [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(8): 1326-1330.
- [11] WU J, YANG S, CHEN Y, et al. A low profile dual-polarized wideband omnidirectional antenna based on AMC reflector [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(1): 368-374.
- [12] LIU J, LI J Y, YANG J J, et al. AMC-loaded low-profile circularly polarized reconfigurable antenna array [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(7): 1276-1280.
- [13] CAO Y F, ZHANG X Y, MO T. Low-profile conical-pattern slot antenna with wideband performance using artificial magnetic conductors [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(5): 2210-2218.
- [14] JIANG Z, WANG Z, NIE L, et al. A low-profile ultrawideband slotted dipole antenna based on artificial magnetic conductor [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(4): 671-675.
- [15] JOUBERT J, VARDAXOGLU J C, WHITTON W G, et al. CPW-fed cavity-backed slot radiator loaded with an AMC reflector [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(2): 735-742.
- [16] ZHU J, LI S, LIAO S, et al. Wideband low-profile highly isolated MIMO antenna with artificial magnetic conductor [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(3): 458-462.