

基于超表面的宽带低剖面圆极化天线

牛旭印^{1,2}, 尤政^{1,2}, 武广乾^{1,2}, 王少锋^{1,2*}

(1. 山西大学 物理电子工程学院, 山西 太原 030006;

2. 山西大学 无线通信与检测山西省重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要: 设计了一种基于超表面的宽带低剖面圆极化缝隙天线, 可应用于C波段卫星通信。该天线由16个呈 4×4 周期排列的“Z”形单元所构成的极化转换超表面和缝隙天线组成。在缝隙天线上加载极化转换超表面, 可以将来自缝隙天线的线极化波转换为圆极化波, 实现圆极化。为了验证仿真结果, 制作了一个尺寸为 $0.59\lambda_0\times 0.59\lambda_0\times 0.076\lambda_0$ (λ_0 为5.2 GHz时自由空间的波长)的天线样本进行测试。实测结果表明, 天线的 -10 dB阻抗带宽为45.8% (3.99~6.36 GHz), 3 dB轴比带宽为24.7% (4.93~6.32 GHz), 峰值增益达到6.05 dBi, 与仿真结果相比具有良好的一致性。

关键词: 超表面; 低剖面; 宽带; 圆极化

中图分类号: TN823+.24

文献标识码: A

doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025082

引用格式: 牛旭印, 尤政, 武广乾, 等. 基于超表面的宽带低剖面圆极化天线[J]. 测试技术学报, 2025, 39(6): 737-744.

NIU Xuyin, YOU Zheng, WU Guangqian, et al. Broadband low-profile circularly polarized antenna based on metasurface[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(6): 737-744.

Broadband Low-Profile Circularly Polarized Antenna Based on Metasurface

NIU Xuyin^{1,2}, YOU Zheng^{1,2}, WU Guangqian^{1,2}, WANG Shaofeng^{1,2*}

(1. College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Wireless Communication and Detection, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: A broadband low-profile circularly polarized slot antenna based on a metasurface is proposed for C-band satellite communication. The antenna integrates a polarization-converting metasurface, composed of 16 “Z”-shaped units arranged in a 4×4 periodic array, with a slot antenna. By loading the metasurface onto the slot antenna, linearly polarized waves generated by the slot antenna are converted into circularly polarized waves, enabling efficient polarization conversion. To validate the design, a prototype with dimensions of $0.59\lambda_0\times 0.59\lambda_0\times 0.076\lambda_0$ (where λ_0 denotes the free-space wavelength at 5.2 GHz) was fabricated and experimentally characterized. Measurement results demonstrate a -10 dB impedance bandwidth of 45.8% (3.99~6.36 GHz), a 3 dB axial ratio bandwidth of 24.7% (4.93~6.32 GHz), and a peak gain of 6.05 dBi. The experimental results exhibit excellent agreement with simulations, confirming the effectiveness of the proposed antenna design for broadband and low-profile applications in satellite communication systems.

Key words: metasurface; low-profile; broadband; circular polarization

收稿日期: 2025-01-02

基金项目: 山西省基础研究计划项目(202303021212002)

作者简介: 牛旭印(2000—), 男, 硕士生, 主要从事圆极化天线研究。E-mail: 2264224924@qq.com。

* 通信作者: 王少锋(1989—), 男, 讲师, 博士, 主要从事光电探测、超宽带天线、圆极化天线等研究。E-mail: wangshaofeng@sxu.edu.cn。

0 引言

随着通信技术的发展,圆极化天线因其具有降低多径干扰、接收任意极化波等优势,在卫星通信、雷达导航、射频识别等多个领域被广泛应用^[1]。微带贴片天线由于其结构简单、剖面较低、易于制造等优点,常被用于圆极化天线的设计^[2-3],但存在阻抗带宽窄等缺点。

近年来,越来越多的学者将超表面技术应用于圆极化天线设计中。超表面的引入不仅可以解决微带贴片天线的带宽窄的问题,还可进一步提高天线的增益,并有助于实现天线的圆极化和小型化^[4-8]。Safari等^[9]通过在圆极化微带天线上放置双层超表面,使天线的增益提高了约4.7 dBi,阻抗带宽和轴比带宽增加了约3%;Rajanna等^[10]将呈9×9周期排列的开口的正方形环超表面放置在微带贴片天线上,实现了天线的高增益和圆极化,天线的轴比带宽为6.87%(7.11~7.59 GHz);Hussain等^[11]通过在缝隙天线上下分别加载相同的4×4周期矩形截角的超表面,天线的轴比带宽达到14.3%(5.2~6.0 GHz),并实现了双圆极化。尽管上述研究在改善天线性能方面取得了有效成果,但仍存在一些问题,如天线尺寸较大、剖面较高,以及阻抗带宽和轴比带宽仍相对较窄等。一些学者开始通过设计极化转换超表面单元,使天线在低剖面的基础上,实现宽带的圆极化性能^[12-15]。Liu等^[12]利用旋转45°的周期椭圆形超表面,实现了天线由线极化到圆极化的极化转换,天线的-10 dB阻抗带宽为20.6%(5.0~6.15 GHz),3 dB轴比带宽为17.4%(5.25~6.25 GHz),天线剖面仅为0.067λ₀,实现了较低的剖面;Zheng等^[13]对正方形截角设计了箭头形超表面单元,该天线的-10 dB阻抗带宽为33.6%(4.45~6.25 GHz),3 dB轴比带宽为18.2%(5.05~6.05 GHz),不仅增加了天线的阻抗带宽,还将天线剖面降至0.06λ₀;Dong等^[14]设计了一种非均匀的正方形切角超表面,进一步扩展了天线阻抗带宽,天线阻抗带宽和轴比带宽分别为39.3%(4.28~6.37 GHz)和17.8%(5.18~6.19 GHz),天线剖面为0.06λ₀;Zhang等^[15]设计了一种非均匀的六边超表面单元,该天线的-10 dB阻抗带宽为27.3%(3.97~5.45 GHz),3 dB轴比带宽为17.7%(4.4~5 GHz),天线剖面

仅为0.056λ₀。基于上述研究,设计新型极化转换超表面,对于实现低剖面、宽带的圆极化天线具有重要意义。

本文设计了一款基于超表面的宽带低剖面圆极化天线,通过设计由“Z”形单元周期排列而成的极化转换超表面,并采用共面波导缝隙耦合馈电的方式激励超表面,在保证天线低剖面的同时,实现了天线的圆极化。所提天线-10 dB阻抗带宽达到45.8%(3.99~6.36 GHz),3 dB轴比带宽达到24.7%(4.93~6.32 GHz),在工作频段内测得最高增益为6.05 dBi,在C波段具有良好的应用前景。

1 天线设计与分析

1.1 天线结构设计

天线结构由超表面和缝隙天线两部分组成,如图1所示。超表面由16个“Z”型单元4×4周期性排列组成,印刷在上层介质基板。缝隙天线印刷在下层介质基板上,由蚀刻了阶梯状矩形槽的全金属接地板和共面波导微带线组成。天线的介质基板均采用介电常数 $\epsilon_r=4.4$ 、损耗角正切 $\delta=0.02$ 的FR4。该天线具体尺寸参数如表1所示。

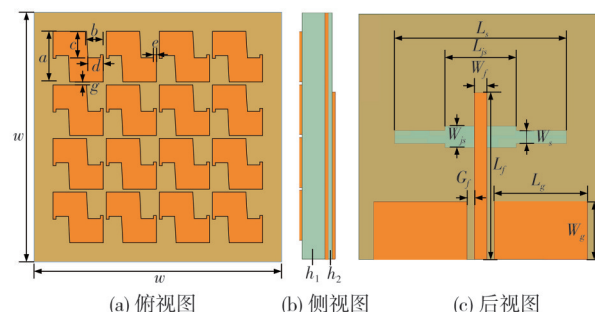


图1 天线的结构图

Fig. 1 Structural diagram of antenna

表1 天线的尺寸参数

Tab. 1 Dimensional parameters of antenna

参数	值/mm	参数	值/mm	参数	值/mm
w	34	g	0.4	L_f	23.1
a	6.9	h_1	3.7	W_{js}	3
b	2.3	h_2	0.7	L_{js}	10
c	3.6	W_s	1.8	G_f	1
d	2.1	L_s	24	W_g	8
e	0.4	W_f	1.8	L_g	13

1.2 超表面分析

正方形超表面单元1为初始结构,如图2(a)所示。在保持超表面单元周期尺寸相同的情况

下,对正方形超表面单元1进行矩形切对角处理,得到超表面单元2,如图2(b)所示。对超表面单元2切去一对三角形和一对矩形对角得到超表面单元3,如图2(c)所示。

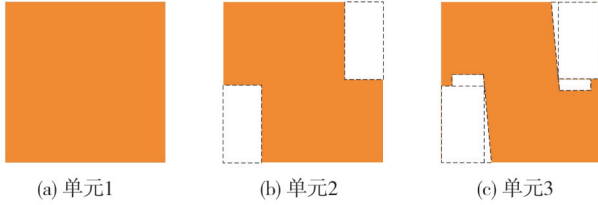
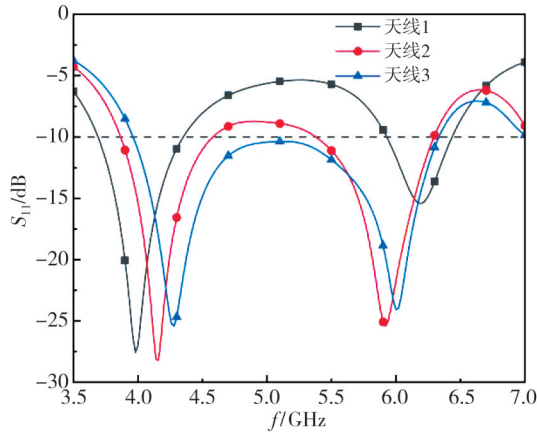


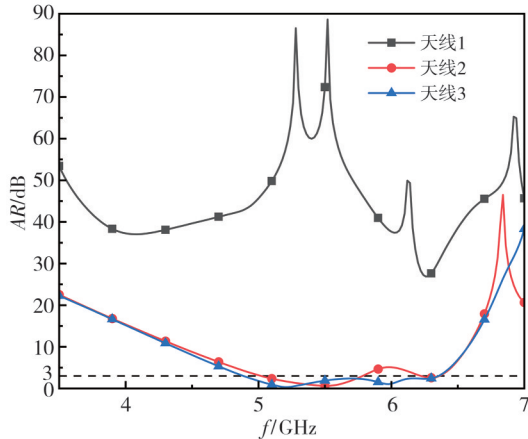
图2 3种天线的超表面单元

Fig. 2 Metasurface units of three types of antennas

对加载3种不同的超表面单元的进行了仿真对比,如图3所示。



(a) S_{11} 曲线对比



(b) AR曲线对比

图3 3种天线的 S_{11} 和AR结果

Fig. 3 S_{11} and AR results of three types of antennas

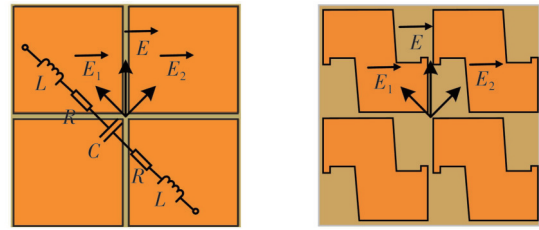
由图3(a)可知,加载了3种不同超表面单元的 天线1、天线2和天线3的-10 dB阻抗带宽逐渐变宽,阻抗匹配程度变好。由图3(b)可知,加载超表面单元1的天线,轴比大于26 dB,此时天线辐射极化波。加载超表面单元2的天线,3 dB轴比带宽为5.02~5.78 GHz和6.22~6.36 GHz,实现了天线的

圆极化。加载超表面单元3的天线,3 dB轴比带宽达到4.89~6.35 GHz,相比于加载超表面单元1和超表面单元2的天线,轴比带宽进一步扩展。

综上,通过对天线超表面单元的切角处理,天线的阻抗带宽和轴比带宽得到了有效改善。

1.3 圆极化分析

当超表面置于缝隙天线上方时,超表面产生的电场 E 可以分解为两个正交分量 E_1 和 E_2 ,如图4(a)所示。



(a) 无切角单元

(b) 有切角单元

图4 两种超表面单元的电场分量和等效电路图

Fig. 4 Electric field components and equivalent circuit diagrams of two types of metasurface units

当超表面单元没有进行切角处理时,正交分量 E_1 和 E_2 会产生相同阻抗,该阻抗的等效RLC (Resisto-Inductor-Capacitor)电路表达式为

$$Z = 2R + j\omega(2L) + \frac{1}{j\omega C} = R' + jX', \quad (1)$$

式中: R 和 L 分别为每个超表面单元的电阻和电感; C 为相邻超表面单元之间间隙所产生的电容。对超表面单元切角处理,如图4(b)所示,此时超表面单元结构不再对称, E_1 和 E_2 将分别产生不同的阻抗,阻抗的等效RLC电路表达式分别为

$$Z_1 = 2R_1 + j\omega(2L_1) + \frac{1}{j\omega C_1} = R'_1 + jX'_1, \quad (2)$$

$$Z_2 = 2R_2 + j\omega(2L_2) + \frac{1}{j\omega C_2} = R'_2 + jX'_2. \quad (3)$$

切角处理使超表面单元对角之间的缝隙加宽,导致 Z_1 中的阻抗值 X'_1 减小, Z_2 中的阻抗值 X'_2 增大,此时 E_2 的相位滞后于 E_1 。因此,可通过改变超表面切角的大小来改变 Z_1 与 Z_2 的大小和相位差。当超表面中 $|Z_1|=|Z_2|$ 且 $\angle Z_1 - \angle Z_2 = 90^\circ$ 时,则 $|E_1|=|E_2|$ 和 $\angle E_1 - \angle E_2 = 90^\circ$,即可实现天线的右旋圆极化^[12]。

为了进一步研究天线的圆极化特性,对超表面天线在5 GHz处的表面电场进行了分析,如图5所示。在一个完整的周期内,超表面的表面电场围绕

+Z轴呈现右手螺旋变化,此时天线辐射右旋圆极化波。

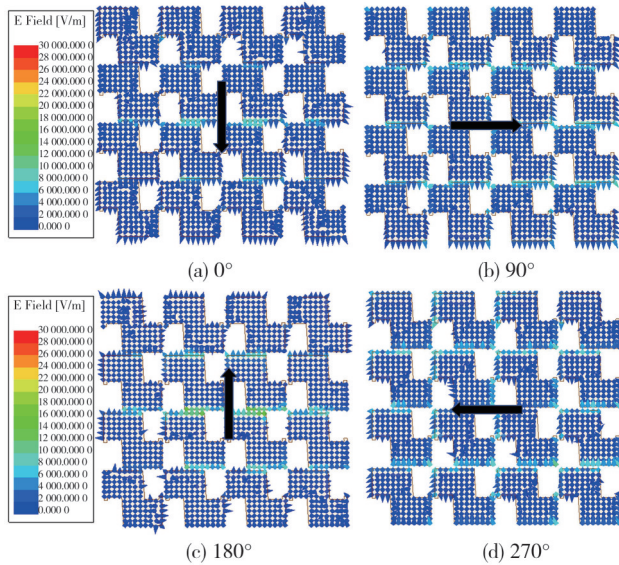


图5 超表面的表面电场

Fig. 5 Surface electric field of metasurface

本文研究了超表面天线的带宽展宽机理,对未加载超表面的天线和加载超表面3的天线S参数进行分析,如图6所示。

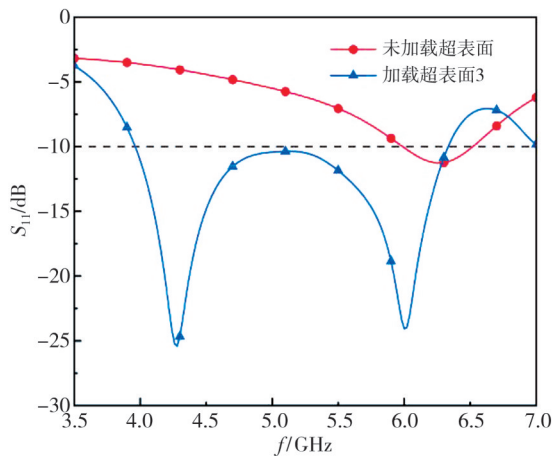


图6 加载和未加载超表面 S_{11} 曲线对比

Fig. 6 Comparison of S_{11} curves between loaded and unloaded metasurfaces

相较于未加载超表面的天线,加载超表面3的天线引入了新的谐振点,正是因为存在两个邻近的谐振点,才能够展宽阻抗带宽。由图7可知,超表面单元2切角处理后,延长了超表面单元3的表面电流路径,这改变了单元的等效电路参数,调整了 TM_{10} 模和反相 TM_{20} 模的谐振频率,使两个模式的谐振点靠近,形成连续的阻抗带宽。同时,切角优化了正交分量的相位差,使轴比在4.89~6.35 GHz内稳定小于3 dB。Liu等^[16]研究

表明同时激发两种谐振模式(TM_{10} 模式和反相 TM_{20} 模式)的超表面加载在缝隙天线上,可以实现宽频带性能。图8给出了超表面天线的两个阻抗谐振点(4.3 GHz和6 GHz)的电场分布图,验证了其两种谐振模式: TM_{10} 模式和反相 TM_{20} 模式。

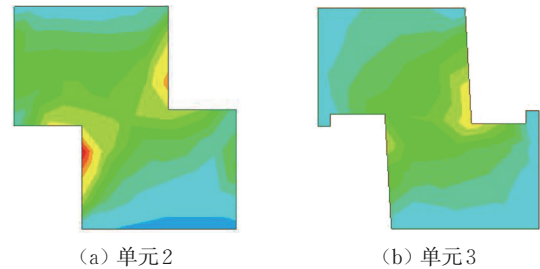


图7 超表面单元的表面电流

Fig. 7 Surface current of antenna metasurface unit

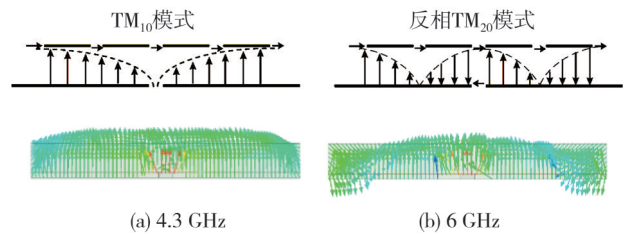


图8 不同频率下两种谐振模式

Fig. 8 Two resonance modes at different frequencies

2 天线性能分析

为了理解天线的宽带圆极化工作特性,需要对超表面单元边长 a 和超表面单元间距 g 进行分析。天线的 S_{11} 和轴比随各参数变化结果如图9所示。

由图9(a)、9(b)可知,当 a 从6.7 mm增加到6.9 mm时,天线的 S_{11} 和轴比整体向低频偏移,天线的阻抗带宽由44.55%(4.1~6.45 GHz)增加至46.06%(3.96~6.33 GHz),轴比带宽由24.8%(5.12~6.57 GHz)增加至25.98%(4.89~6.35 GHz);当 a 从6.9 mm增加到7.1 mm时,天线的阻抗匹配程度变差,轴比基本不变。

由图9(c)和9(d)可知,当 g 从0.2 mm增加到0.4 mm时,天线的 S_{11} 和轴比的低频段部分向高频偏移,阻抗匹配程度逐渐变好;当 g 从0.4 mm增加到0.6 mm时,天线的 S_{11} 和轴比的低频段部分继续向高频偏移,天线的阻抗带宽由46.06%(3.96~6.33 GHz)减小至40.75%(4.24~6.41 GHz),轴比带宽由25.98%(4.89~6.35 GHz)减小至20.12%(5.23~6.4 GHz)。

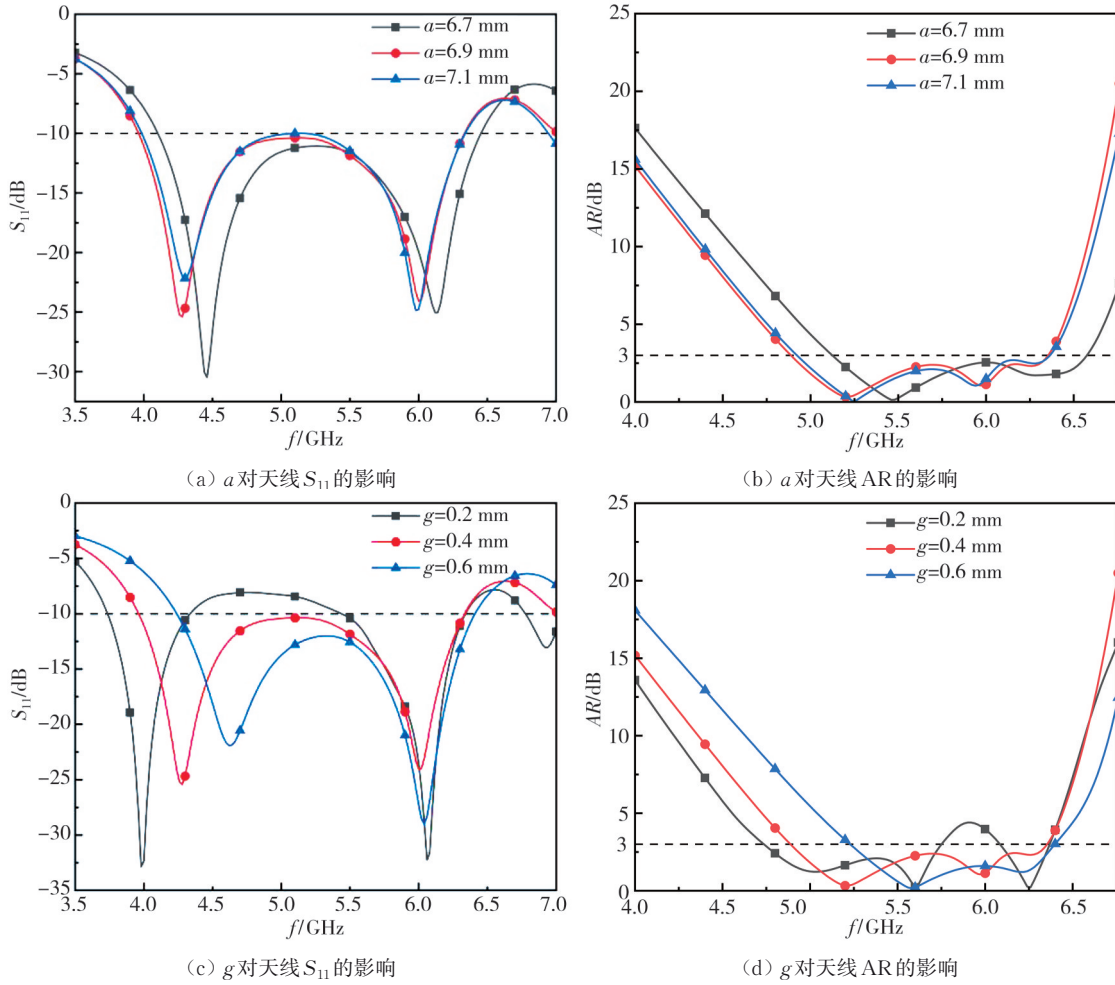


图 9 各参数对天线 S_{11} 和 AR 的影响

Fig. 9 The impact of various parameters on antenna S_{11} and AR

利用 HFSS 软件调节天线的各个参数来实现对天线阻抗带宽和轴比带宽的优化。最终确定 $a=6.9\text{ mm}$, $g=0.4\text{ mm}$, 此时天线的工作性能最佳。

3 仿真与实测结果

为了验证天线设计的正确性, 根据设计制作了天线实物模型, 如图 10 所示, 天线的物理尺寸为 $34\text{ mm} \times 34\text{ mm} \times 4.4\text{ mm}$ 。使用矢量网络分析仪测量了天线的 S 参数, 在微波暗室中测量了天线的轴比、增益和辐射方向图。

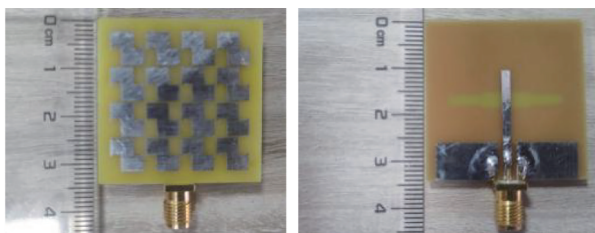


图 10 天线实物图

Fig. 10 Fabricated photographs of the antenna

天线的 S_{11} 和轴比实测结果与仿真对比, 分别如图 11、图 12 所示。

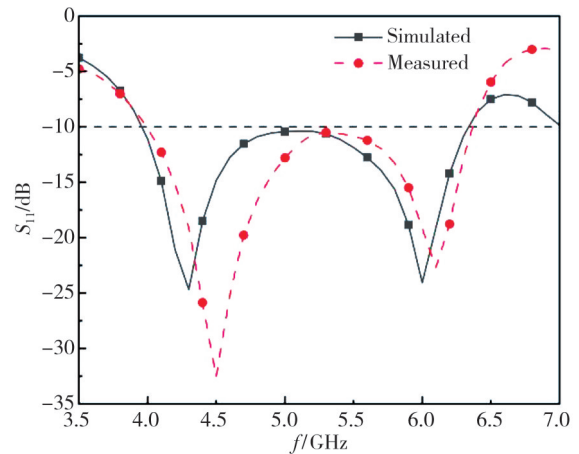


图 11 天线 S_{11} 实测结果与仿真

Fig. 11 Measured and simulated S_{11} of antenna

仿真结果显示, 天线的 -10 dB 阻抗带宽和 3 dB 轴比带宽分别为 46.06% ($3.96\sim 6.33\text{ GHz}$) 和 25.98% ($4.89\sim 6.35\text{ GHz}$)。实测结果显示, 天线的 -10 dB 阻抗带宽为 45.8% ($3.99\sim$

6.36 GHz), 3 dB 轴比带宽为 24.7% (4.93~6.32 GHz)。与仿真结果相比, 实测的阻抗带宽和轴比带宽整体向高频方向偏移, 这种差异是由于天线加工精度和测量环境造成的。

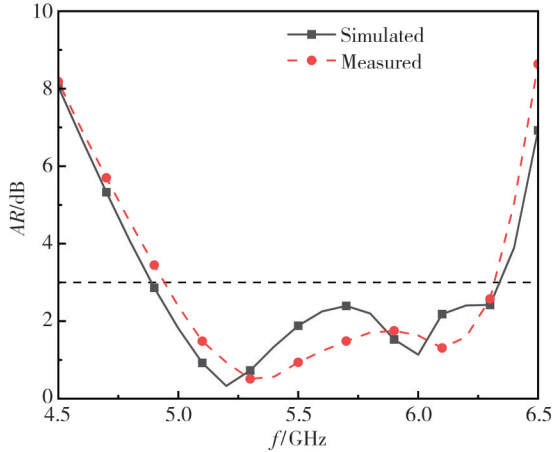


图 12 天线轴比实测结果与仿真

Fig. 12 Measured and simulated AR of antenna

图 13 为天线仿真与实测的增益对比, 仿真结果与实测具有良好的一致性, 在 4~6.25 GHz 范围内, 增益均大于 4 dBi, 天线有着较好的辐射性能。其中, 仿真的峰值增益为 6.14 dBi, 实测的峰值增益为 6.05 dBi。

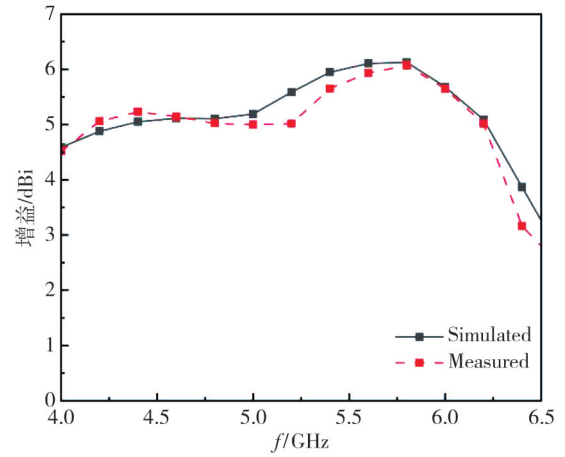


图 13 天线增益实测结果与仿真

Fig. 13 Measured and simulated gain of antenna

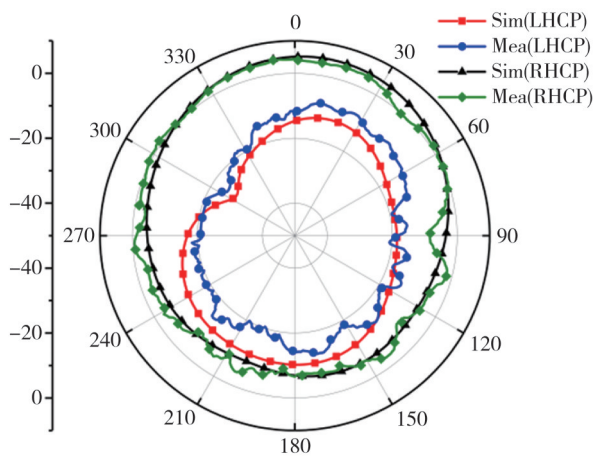
图 14 为天线分别在 5.2 GHz 和 5.7 GHz 处 xoz 平面和 $yo z$ 平面的实测和仿真远场辐射方向图, 仿真和实测结果基本保持一致, 天线呈现出较好的右旋圆极化。其中的偏差主要是由于天线制作误差和测量环境造成。验证了前文对超表面进行圆极化分析可以实现天线的右旋极化。

表 2 为本文设计的天线与同类型天线尺寸及性能的对比。

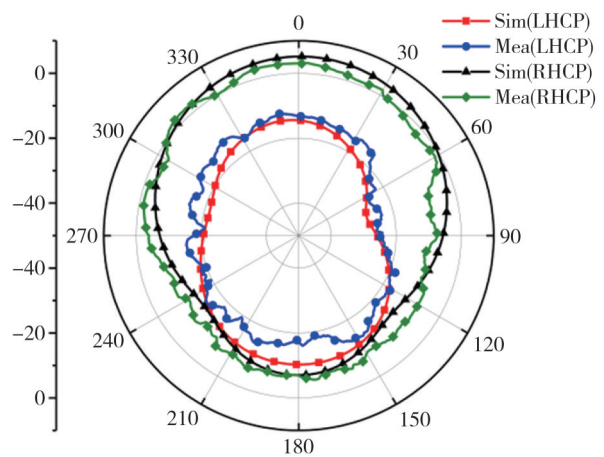
表 2 对比分析

Tab. 2 Contrastive analysis

来源	天线尺寸/ λ_0^3	-10 dB 阻抗带宽/%	3 dB 轴比带宽/%	最大增益/dBi
文献[6]	$1.81 \times 1.81 \times 0.05$	37.3(4.8~7 GHz)	22.5(5~6.27 GHz)	10
文献[7]	$0.58 \times 0.58 \times 0.056$	45.6(4.7~7.48 GHz)	23.4(4.9~6.2 GHz)	7.6
文献[11]	$0.86 \times 0.67 \times 0.13$	22.6(5.1~6.4 GHz)	14.3(5.2~6.0 GHz)	4.8
文献[12]	$0.79 \times 0.79 \times 0.067$	20.6(5.0~6.15 GHz)	17.4(5.25~6.25 GHz)	8
文献[13]	$0.71 \times 0.71 \times 0.06$	33.6(4.45~6.25 GHz)	18.2(5.05~6.05 GHz)	7.95
文献[14]	$0.65 \times 0.65 \times 0.06$	39.3(4.28~6.37 GHz)	17.8(5.18~6.19 GHz)	6.8
文献[15]	$0.88 \times 0.88 \times 0.056$	27.3(3.97~5.45 GHz)	17.7(4.4~5 GHz)	8.9
本文	$0.59 \times 0.59 \times 0.076$	45.8(3.99~6.36 GHz)	24.7(4.93~6.32 GHz)	6.05



(a) 5.2 GHz 处 xoz 面



(b) 5.2 GHz 处 $yo z$ 面

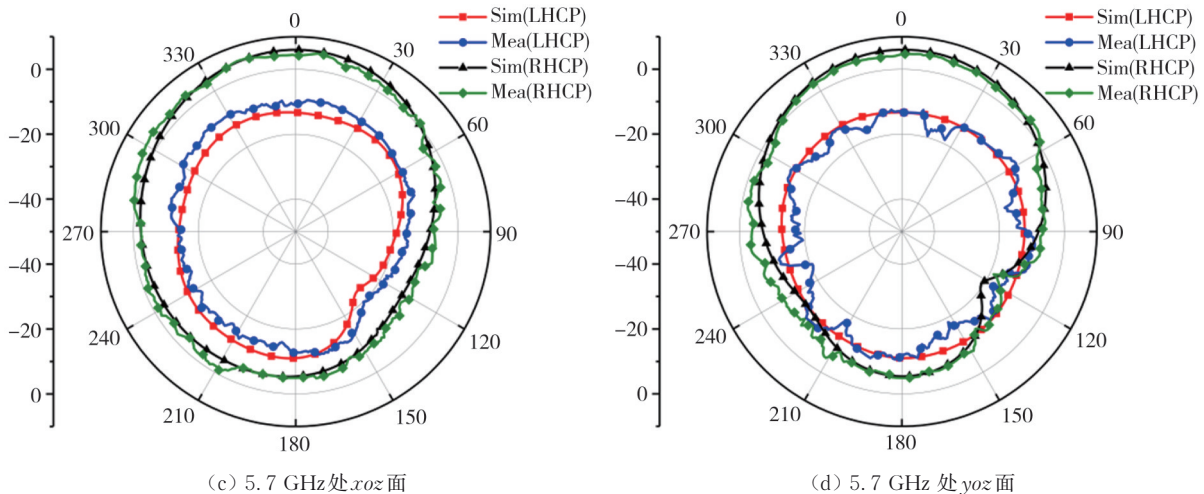


图 14 天线方向图实测与仿真对比

Fig. 14 Comparison of measured and simulated radiation patterns of antenna

由表 2 可知, 本文设计的天线的剖面高度和最大增益优于文献[11], 低于文献[6-7]、[12-15]中的设计, 但所提出的天线在-10 dB 阻抗带宽和 3 dB 轴比带宽方面均优于文献[6-7]、[11-15]中的天线设计, 带宽最宽。综上所述, 本文提出的超表面圆极化天线具有宽带低剖面特性, 在 C 波段具有良好的应用前景。

4 结 论

本文设计了一种基于超表面的宽带低剖面圆极化天线。通过设计 4×4 周期排列的“Z”形单元构成的极化转换超表面, 将其加载在缝隙天线上, 在保持 $0.076\lambda_0$ 低剖面的同时, 实现了天线的宽带圆极化。缝隙天线一侧蚀刻阶梯状矩形槽, 另一侧为共面波导微带线, 通过共面波导缝隙耦合馈电方式激励超表面, 优化天线的阻抗匹配。实测结果与仿真基本一致, 天线实测的-10 dB 阻抗带宽为 45.8% (3.99~6.36 GHz), 3 dB 轴比带宽为 24.7% (4.93~6.32 GHz), 具有较宽的阻抗带宽和轴比带宽, 适用于 C 波段卫星通信。

参考文献:

[1] 韩国瑞, 张倩, 陈新伟, 等. 一种宽带圆极化缝隙天线的研究与设计[J]. 测试技术学报, 2024, 38(2): 129-138.
HAN Guorui, ZHANG Qian, CHEN Xinwei, et al. Research and design of broadband circularly polarized slot antenna [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(2): 129-138. (in Chinese)
[2] LI J F, XU T, TIAN X X, et al. A circularly polarized patch antenna with a slotted parasitic loop [J].

Microwave and Optical Technology Letters, 2022, 64 (8): 1442-1447.
[3] ZHOU Q, FU G, SUN C. High-gain low-profile circularly polarized patch antenna for universal RFID reader application [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2022, 36(2): 285-306.
[4] SHI T, CHAI R, CHEN X, et al. A low-profile, circularly polarized, metasurface-based antenna with enhanced bandwidth and stable high gain [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22 (2): 253-257.
[5] LIU J, LI J Y, CHEN Z N. Broadband polarization conversion metasurface for antenna RCS reduction [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(5): 3834-3839.
[6] ZHENG Q, GUO C, VANDENBOSCH G A E, et al. Low-profile circularly polarized array with gain enhancement and RCS reduction using polarization conversion EBG structures [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(3): 2440-2445.
[7] TA S X, PARK I. Low-profile broadband circularly polarized patch antenna using metasurface [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63 (12): 5929-5934.
[8] PANG H, ZHAO J, XU J. Miniaturized circularly polarized metasurface antenna based on characteristic mode analysis [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2024, 66(1): e33983.
[9] DEHNAVI M S, RAZAVI S M J, ARMAKI S H M. Improvement of the gain and the axial ratio of a circular polarization microstrip antenna by using a meta-material superstrate [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2019, 61(10): 2261-2267.

- [10] RAJANNA P K T, RUDRAMUNI K, KANDASAMY K. A high-gain circularly polarized antenna using zero-index metamaterial [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(6): 1129-1133.
- [11] HUSSAIN N, NAQVI S I, AWAN W A, et al. A metasurface-based wideband bidirectional same-sense circularly polarized antenna [J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2020, 30(8): e22262.
- [12] LIU Y, HUANG Y X, LIU Z W, et al. Design of a compact wideband CP metasurface antenna [J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2020, 30(10): e22332.
- [13] ZHENG Q, GUO C, DING J. Wideband and low RCS circularly polarized slot antenna based on polarization conversion of metasurface for satellite communication application [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2018, 60(3): 679-685.
- [14] DONG J, DING C, MO J. A low-profile wideband linear-to-circular polarization conversion slot antenna using metasurface [J]. *Materials*, 2020, 13(5): 1164.
- [15] ZHANG J, JIN H, WANG W, et al. A non-uniform metasurface-based wideband CP antenna with additional filtering response [C]//2022 IEEE 10th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), 2022: 1-2.
- [16] LIU W, CHEN Z N, QING X. Metamaterial-based low-profile broadband aperture-coupled grid-slotted patch antenna [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(7): 3325-3329.