

共面波导馈电的双频低剖面超表面天线的设计

郭亚斌, 李莉*, 张晓卫, 张文梅

(山西大学 物理电子工程学院, 山西 太原 030006)

摘要:本文设计了一款加载超表面的双频天线,该天线采用共面波导馈电,通过在微带天线上开两对矩形槽,改变天线的电流分布,使天线实现双频工作。进一步将一个由正六边形单元组成的超表面结构加载到天线介质基板的上层,有效地展宽了天线带宽,提高了天线增益。天线尺寸为 $52\text{ mm}\times 52\text{ mm}\times 0.8\text{ mm}$,且由于微带天线与超表面结构是加载在同一介质板的上下底面,使天线具有体积小、剖面低、结构简单的优点。测量结果显示,所设计的天线在 -10 dB 时阻抗带宽为 900 MHz ,天线工作在 $4.48\text{ GHz}\sim 4.74\text{ GHz}$ 和 $5.72\text{ GHz}\sim 6.02\text{ GHz}$ 两个波段,覆盖卫星C波段以及Wi-Fi波段,工作范围内峰值增益为 4.75 dBi 。

关键词:超表面;贴片天线;双频天线

中图分类号:O436

文献标志码:A

文章编号:0253-2395(2026)02-0323-08

Design of Dual Frequency Low Profile Metasurface Antenna Fed by Coplanar Waveguide

GUO Yabin, LI Li*, ZHANG Xiaowei, ZHANG Wenmei

(School of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: A high gain antenna loaded with metasurface is proposed. The antenna is fed by a coplanar waveguide. By opening two pairs of rectangular slots on the microstrip antenna, the current distribution of the antenna is changed, enabling dual frequency operation and miniaturization of the antenna. Furthermore, the peak gain of the antenna is improved and the bandwidth is broadened by loading metasurface in the top surface of dielectric. The realized antenna has a low profile and small size of $52\text{ mm}\times 52\text{ mm}\times 0.8\text{ mm}$ because the patch and the metasurface directly loaded on two sides of dielectric. The measurement results show that the designed antenna has an impedance bandwidth of -10 dB of 900 MHz ($4.48\text{ GHz} - 4.74\text{ GHz}$, $5.72\text{ GHz} - 6.02\text{ GHz}$), covering of satellite C-band and Wi-Fi band. The peak gain is 4.75 dBi within the operating frequency range.

Key words: metasurface; patch antenna; dual-frequency antenna

0 引言

随着无线通信的发展,要求天线向小型化、多频段、高性能、高宽带等方向发展,紧凑的双频段天线受到了国内外学者的广泛关注^[1-2]。

共面波导馈电的双频微带天线不仅保持了低剖面、易于实现、体积小等优点^[3],同时易于实现宽的频段^[4-6]和高的增益^[7-8],因此被广泛应用于小型化和高性能的系统中。

早期的共面波导馈电的微带天线常采用开

收稿日期:2024-02-26;修回日期:2024-05-10

基金项目:国家自然科学基金(62071282);山西省自然科学基金(202203021211295);山西省高校优秀成果培育项目(2019KJ001)

作者简介:郭亚斌(1996-),男,山西运城人,硕士研究生,研究方向为超表面天线。E-mail:931575895@qq.com

*通信作者:李莉(LI Li),E-mail:lili@sxu.edu.cn

引文格式:郭亚斌,李莉,张晓卫,等.共面波导馈电的双频低剖面超表面天线的设计[J].山西大学学报(自然科学版),2026,49(2):323-330. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2024093.

槽的方法实现双频^[9-11]。例如, Li等设计了一个由单层方形贴片阵列组成的天线, 通过在其底部刻蚀两个微带馈电槽, 使天线能工作在5G系统的两个毫米波频段^[9]。Liu等提出了一种紧凑型的共面波导馈电贴片天线, 通过在矩形贴片中嵌入两种形状的槽实现双频工作^[10]。Chen等提出了一种新型双频共面波导馈电缝隙天线, 通过调整中心槽的长度以及改变径向槽之间的夹角, 可以获得两个工作频率^[11-12]。以上的天线通过开槽的方式实现双频时, 会降低天线的增益^[13], 且天线结构较为复杂。

近年来, 随着超表面技术的不断发展, 由于其能灵活地操控电磁波, 在微带天线中得到了广泛应用。结果表明, 加载超表面可以使微带天线保持低剖面的同时, 改善天线的阻抗特性和辐射特性。例如, 王丽黎等将超表面代替天线的辐射贴片, 通过增加超表面与馈电孔径之间的耦合, 从而拓宽了天线的带宽^[14]。在文献^[15]中, Gu等提出的双频偶极子天线通过在天线上添加超表面, 使其为天线提供低频处的谐振, 从而实现双频工作^[15]。同时, Samantaray和Zhou等也采用加载一层和两层超表面的方式得到了双频天线^[16-17]。上述超表面天线中, 超表面作为辐射单元时, 由于其特殊性, 通常需要多层介质板^[18], 且天线与超表面中间有空气层, 这大大增大了天线剖面^[19]。

综上所述, 普通单层介质双频天线由于开槽导致增益较低, 而加载超表面天线由于使用多层介质, 导致其剖面较高。为了解决以上问题, 本文提出了一款剖面较低、结构简单的双频微带天线。天线采用共面波导馈电, 通过在微带贴片上刻蚀两对矩形槽实现了双频工作。为了进一步提高增益, 在介质基板上表面加载了正六边形单元的超表面结构。仿真和测量结果表明, 天线保持单层结构同时实现了带宽展宽和增益提高。该天线能够实现双频工作(4.39 GHz~4.79 GHz, 5.73 GHz~6.23 GHz), 在工作频率范围内峰值增益为4.75 dBi, 实现了低剖面、宽带宽、高增益的性能。

1 天线设计

1.1 天线结构

图1显示的是天线结构示意图。天线由一层介质基板, 两层金属组成。底层金属是共面波导馈电结构, 刻蚀的两对矩形槽, 为天线提供两个工作频率。天线上层为13个正六边形单元组成的超表面结构, 超表面的周期为 p , 通过在超表面正六边形中间开方形槽可以使天线与超表面更好地耦合。整个设计采用的是相对介电常数为4.4的FR-4介质基板, 厚度为0.8 mm, 损耗正切角为0.02。天线剖面较低、结构简单、易于加工。优化后的设计尺寸如表1所示。其中 w_u 为正六边形中心开槽的正方形尺寸, y_1 为正六边形长度, p 为正六边形之间的距离, w_m 下底面矩形金属条宽度, f_1 和 f_2 分别代表两个矩形槽的长度, q 为矩形槽的宽度, s 为馈电结构缝隙宽度, t_1 和 t_2 分别代表两个矩形槽的高度, w_g 和 h_g 为正方形介质板的宽度和厚度。

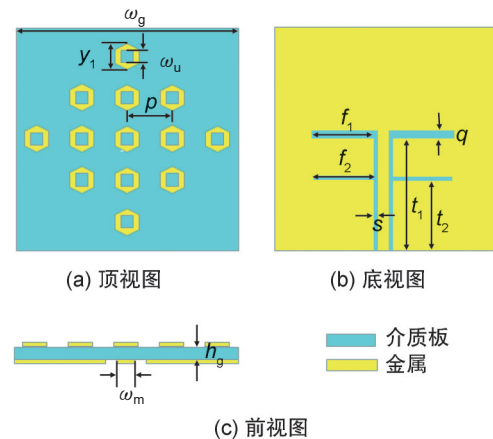


图1 天线结构示意图

Fig. 1 Diagram of antenna structure

表1 优化的天线设计尺寸(mm)

Table 1 Dimensions of optimized antenna design (mm)

w_g	w_u	y_1	p	w_m	f_1	f_2	q	s	t_1	t_2
52	3	8	9	4	15	11	2	0.3	29	16

1.2 天线的设计过程

图2为天线的设计过程。Ant1为共面波导馈电的微带天线, 该天线由介质基板及其底面的馈电结构组成。从图3中可以看出, 该天线只能单频工作。通过在共面波导馈电结构上刻蚀

矩形槽天线可以实现双频工作,将此技术应用于Ant1得到了Ant2,其仿真结果见图3和图4。由图可知, Ant2确实实现了双频工作,但天线增益较低。在不改变天线底面结构的前提下,为提高天线增益在天线介质基板的上层加载了超表面,设计出了Ant3的超表面。该超表面由13个正六边形单元组成,均匀分布在介质基板中心和周围。从图3—图4中可以看出,超表面加载之后不仅提高了天线增益,同时使天线实现小型化。但图4的仿真结果显示在低频谐振点处增益不是很理想且带宽较窄。为拓宽天线带宽,进一步改善天线性能,在正六边形中心刻蚀方形槽,使天线与超表面实现更好的耦合。仿真结果显示设计出的Ant4的超表面能够实现双频工作(4.39 GHz~4.79 GHz、5.72 GHz~6.23 GHz)。天线实现宽带宽、高增益的同时,具有剖面低、结构简单、易于实现等优点。

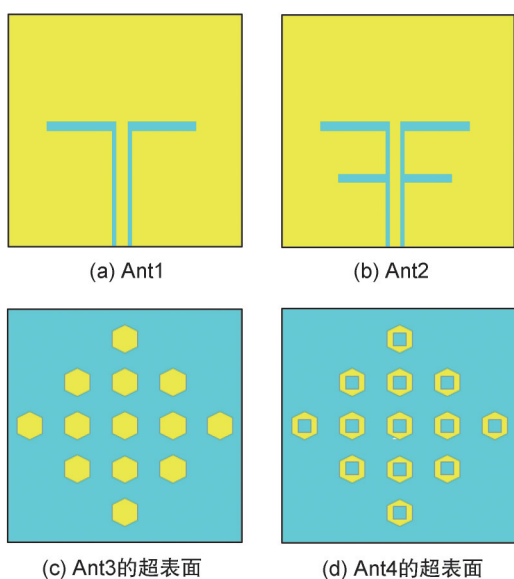


图2 天线的设计过程

Fig. 2 Design process of antenna

图5给出了仿真的图2中两个超表面单元透射幅度,从图中可以看出在超表面中心挖孔,会使超表面透射幅度升高,因此提高了天线增益。

图6显示的是加载超表面后天线在两个频点的电场分布情况。从图中可以看出,当天线工作在4.6 GHz时,电场分布主要集中在上方矩形槽处以及微带线上,由此可以得出天线的

低频点由上方矩形槽决定。同时当天线工作在5.9 GHz时,天线的电场分布主要集中在下方矩形槽处以及微带线上,上方矩形槽分布少量电场,所以下方矩形槽为天线提供了高频点。因此天线可以双频工作。

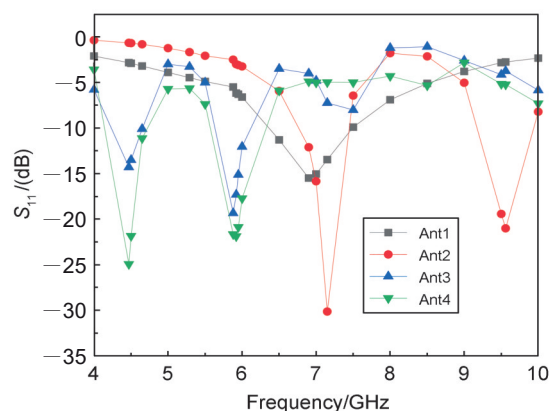


图3 图2中四个天线的散射参数S变化曲线

Fig. 3 S-parameters of four antennas in Fig. 2

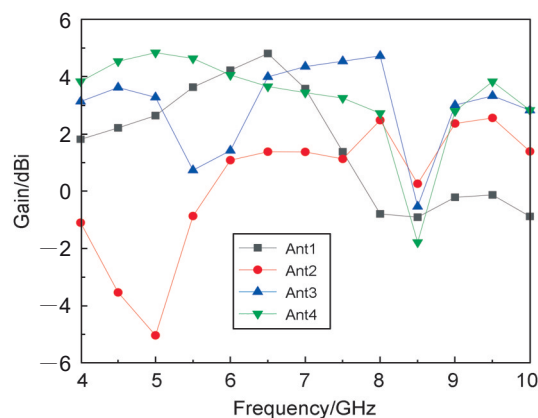


图4 图2中四个天线的增益曲线图

Fig. 4 Gain diagram of four antennas in Fig. 2

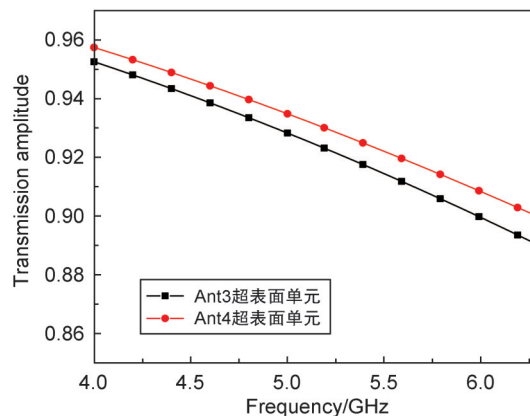


图5 天线3和天线4中两个超表面单元的透射幅度曲线图

Fig. 5 Transmission amplitude of two metasurface units for Ant3 and Ant4

2 参数分析

为了在上述设计中获得最佳天线性能,使 Ant4 天线的两个工作频率都能有较宽的带宽以及较高的增益,对 y_1 、 f_1 以及 f_2 进行仿真优化。在分析中保证每次只改变一个参数,其他参数不发生改变。

图 7 中显示出了不同的六边形尺寸 y_1 的变化对天线 S 参数的影响,从图 7 中可以看出,随

着 y_1 的增大,天线的谐振点在不断发生变化,但天线低于 -10 dB 的阻抗带宽基本不变。当 y_1 从 3.5 mm 增加到 4 mm 时,低频处的谐振由 -15 dB 增加到 -31 dB,谐振效果有明显增加。进一步增加到 4.5 mm 时,高频处的谐振点由 -28 dB 降低为 -14 dB,谐振效果有明显地减弱。为使天线谐振效果更好,使用两个频点 S 参数都较好的 $y_1=4$ mm。

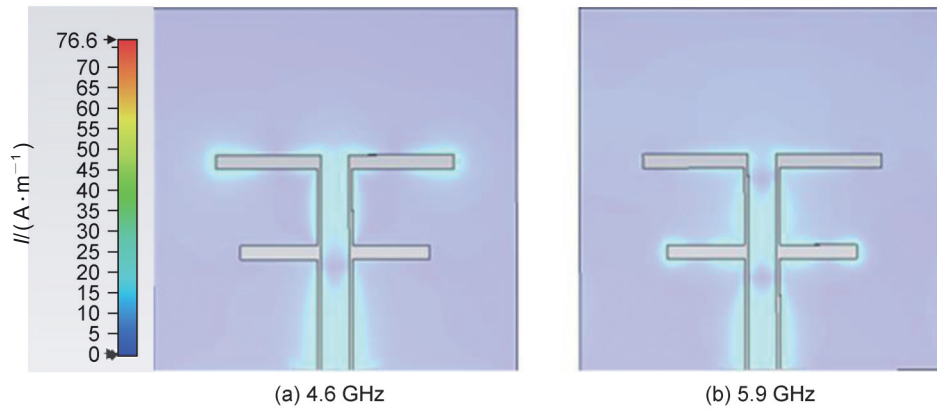


图 6 天线在两个频点的电流分布图

Fig. 6 Current distribution diagram of antenna at two frequency points

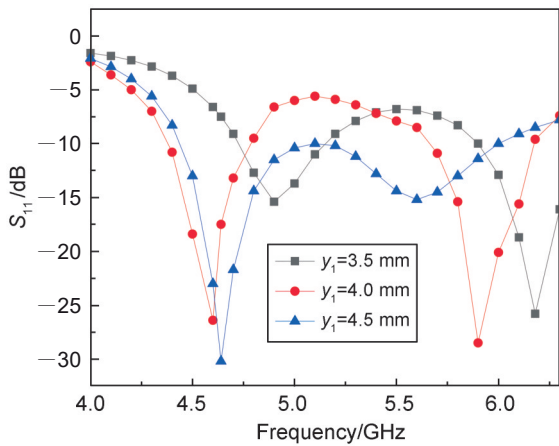


图 7 y_1 对 S 参数的影响

Fig. 7 The impact of y_1 on S parameter

图 8 显示了矩形槽尺寸 f_1 变化时的 S 参数。从图 8 中可以看出随着 f_1 的增大,天线的谐振点先增加后减少。当 f_1 从 10 mm 增加到 15 mm 时,天线由一个谐振点变为两个谐振点,分别为 4.6 GHz 和 5.9 GHz,天线能够实现双频工作。当继续将 f_1 增大到 20 mm 时,天线只能在 5.4 GHz 处产生谐振,所以将 f_1 的尺寸确定为

15 mm。图 9 显示了矩形槽尺寸 f_2 变化时的 S 参数。从图 9 中可以看出随着 f_2 的增大,第一个频点从 4.8 GHz 向低偏移移到 4.5 GHz。当 $f_2=11$ mm 时,第一个频点的 $S_{11}=-28$ dB,且第二个频点的 $S_{11}=-30$ dB。由图 10 可以看出,当 $f_2=11$ mm 时,峰值增益与 $f_2=11.5$ mm 时相同,均为 4.6 dBi。综合天线 S 参数和峰值增益将 f_2 的尺寸确定为 11 mm。

3 结果与讨论

为了验证设计的天线模型。图 11 给出了所设计的天线的顶视图和底视图,该天线印刷在厚度为 0.8 mm 的 FR4 介质板上,使用矢量网络分析仪测试其 S_{11} ,用图 12 的自动天线测量系统在暗室中对天线两个中心频率点的辐射方向图进行测试。测量时将天线固定在发射天线端,且连接发射端口。同时将接收端口中心线与天线对齐,通过旋转发射端的角度,测量天线的辐射方向图。测量结果如图 13—图 16 所示。

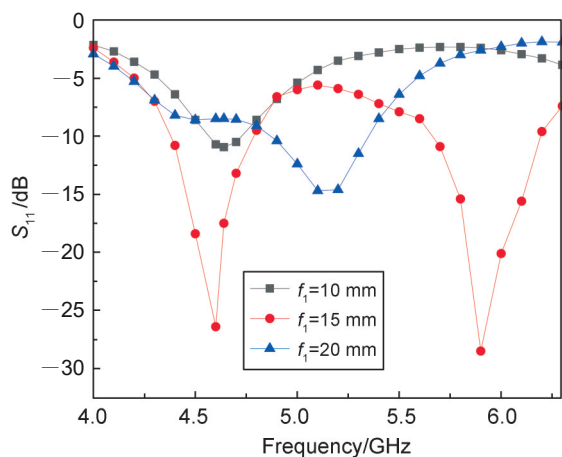


图8 f_1 对S参数的影响

Fig. 8 The impact of f_1 on the S parameter

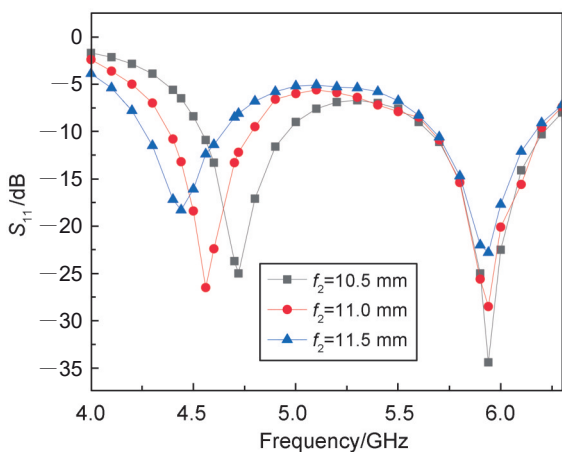


图9 f_2 对S参数的影响

Fig. 9 The impact of f_2 on the S parameter

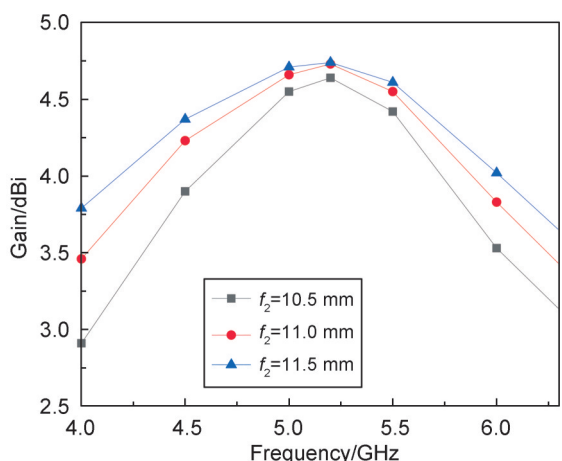
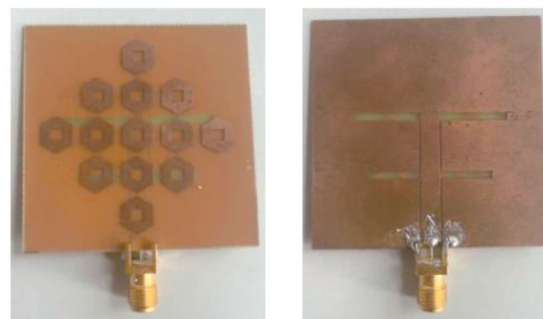


图10 f_2 对天线增益的影响

Fig. 10 The impact of f_2 on antenna gain

图13显示的是仿真和测试的S参数曲线。从图中可以看出实际测量的结果和仿真结果相吻合。测试的工作频率为4.48 GHz~4.74 GHz、

5.72 GHz~6.02 GHz。焊接 SMA(小型A型接头)接头时有一定的偏差可能是导致仿真结果与测试结果有误差的主要原因。



(a) 顶视图

(b) 底视图

图11 天线的顶视图和底视图

Fig. 11 Top and bottom views of the antenna

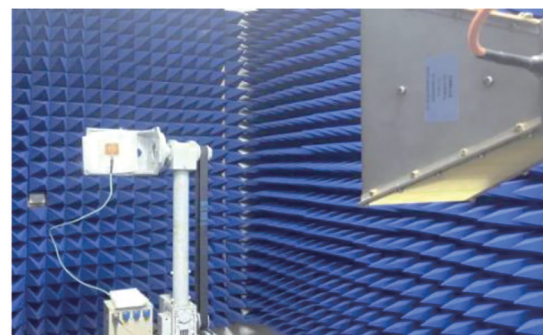


图12 天线测量装置

Fig. 12 Antenna measurement images

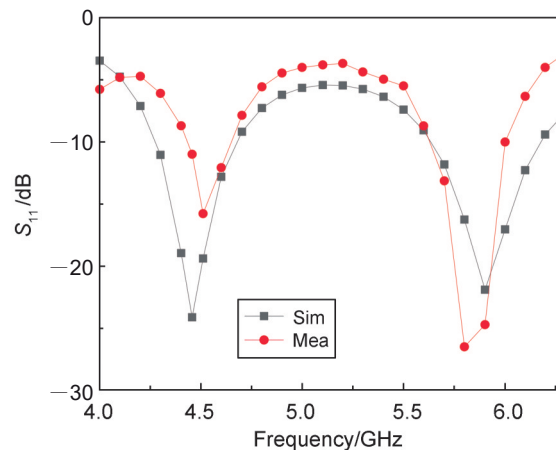


图13 仿真和测量的 S_{11}

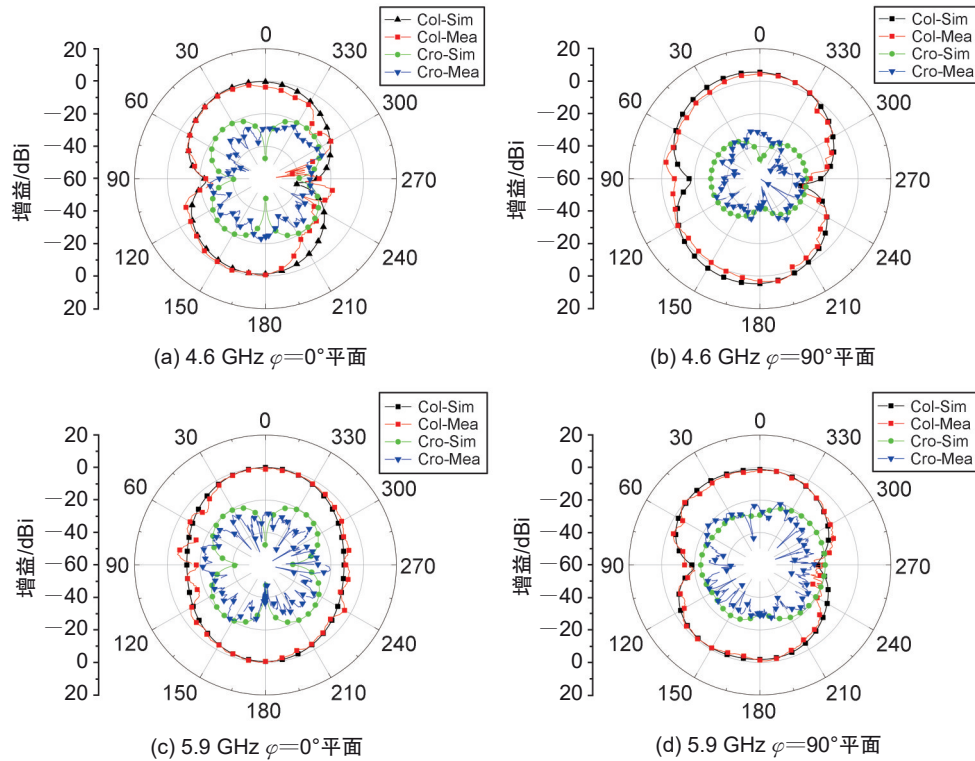
Fig. 13 S_{11} for simulation and measurement

图14为天线在两个谐振点4.6 GHz和5.9 GHz处仿真和测量的归一化的主极化和交叉极化的辐射方向图。从图中可以看出,天线在4.6 GHz主极化方向图为8字形,交叉极化与

主极化相差 20 dB。在 5.9 GHz 的辐射特性与 4.6 GHz 类似。测量与仿真的辐射方向图基本吻合。二者的误差可能是由于测试过程中周围环境反射以及加工测试误差等引起的。从图 15 天线增益曲线图中可以看出,天线的增益随着频率的增加,先增大后减小,在 4.6 GHz 时,达到峰值 4.75 dBi。实测与仿真增益差距最大不超过 0.2 dBi。从图 16 天线的辐

射效率图中可以看出,天线的平均辐射效率达到了 86%,整个工作频段的辐射效率均大于 80%。

表 2 显示的是该设计与文献中的天线的性能对比,从表 2 中可以看出,该天线具有体积较小、增益较高、剖面较低的优点,文献[16-17]中虽然增益略高于本文中的结果,但其所占用的面积大,剖面在本文天线的 10 倍以上。



注:Col代表主极化;Cro代表交叉极化。

图 14 天线在两个中心频率处的辐射方向图

Fig. 14 Radiation pattern of antenna at two central frequencies

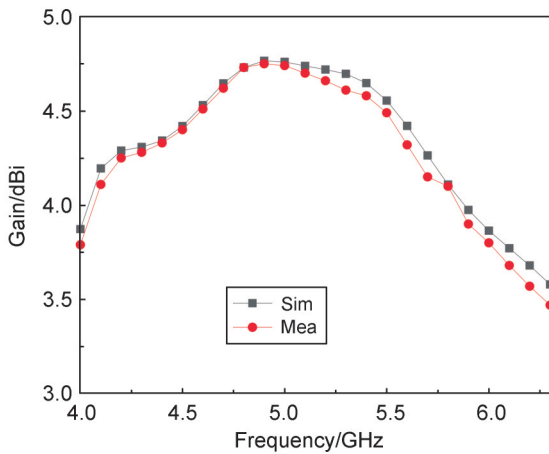


图 15 仿真和测量的天线增益曲线图

Fig. 15 Simulated and measured antenna gain curves

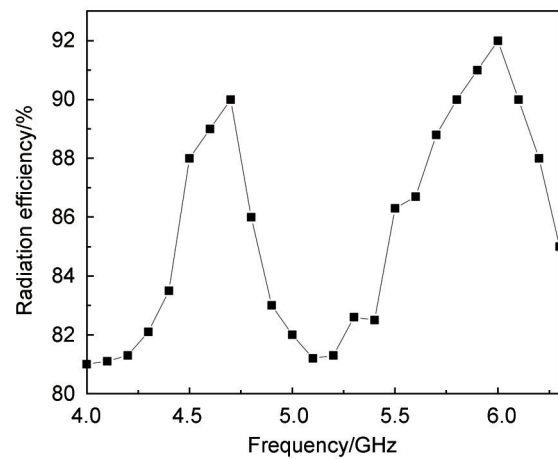


图 16 天线辐射效率

Fig. 16 Efficiency of antenna radiation

表2 双频微带天线性能对比

Table 2 Performance comparison of dual band microstrip antennas

Ref.	Size	Dielectric layer	Bandwidth/GHz	Peak Gain/dBi
[3]	$0.74\lambda_0 \times 0.88\lambda_0 \times 0.02\lambda_0$	1	2.2~2.9, 3.4~3.65	1.5, 2.5
[8]	$0.67\lambda_0 \times 0.67\lambda_0 \times 0.03\lambda_0$	1	3.5~3.6, 4.8~5.0	2.83, 4.35
[15]	$0.58\lambda_0 \times 0.58\lambda_0 \times 0.06\lambda_0$	2	10.6~12.6, 15.3~17.3	4.8, 5.2
[16]	$1.03\lambda_0 \times 1.03\lambda_0 \times 0.15\lambda_0$	2	4.18~4.44, 8.11~11.14	4.5, 8.7
[17]	$1.37\lambda_0 \times 1.37\lambda_0 \times 0.35\lambda_0$	3	2.12~2.75, 5.69~5.91	7.6, 11.5
This work	$0.74\lambda_0 \times 0.74\lambda_0 \times 0.01\lambda_0$	1	4.48~4.74, 5.72~6.02	4.5, 4.5

4 结论

本文设计的加载超表面的双频微带天线,不仅提高了微带天线的带宽以及增益,同时通过加载超表面的方式,使其仍然具有低剖面、小体积的优点。该天线可以覆盖 4.48 GHz~4.74 GHz (卫星 C 波段)、5.72 GHz~6.02 GHz (5 GHz 的 Wi-Fi 波段) 两个频段,并且天线增益以及辐射方向图均满足设计要求。文中提出的在共面波导馈电结构加载超表面的方式,为天线小型化、低剖面提供了很好的思路。

参考文献:

- [1] DANG L, LEI Z Y, XIE Y J, *et al.* A Compact Microstrip Slot Triple-band Antenna for WLAN/WiMAX Applications [J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2010, **9**: 1178-1181. DOI: 10.1109/LAWP.2010.2098433.
- [2] LIU X K, GAO S, SANZ-IZQUIERDO B, *et al.* A Mutual-coupling-suppressed Dual-band Dual-polarized Base Station Antenna Using Multiple Folded-dipole Antenna[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2022, **70**(12): 11582-11594. DOI: 10.1109/TAP.2022.3209177.
- [3] SAINI R K, DWARI S, MANDAL M K. CPW-fed Dual-band Dual-sense Circularly Polarized Monopole Antenna [J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2017, **16**: 2497-2500. DOI: 10.1109/LAWP.2017.2726545.
- [4] CHEN J S. Dual-frequency Annular-ring Slot Antennas Fed by CPW Feed and Microstrip Line Feed[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2005, **53**(1): 569-573. DOI: 10.1109/TAP.2004.838799.
- [5] MISHRA R G, MISHRA R, KUCHHAL P, *et al.* Design and Analysis of CPW-fed Microstrip Patch Antennas for Wide Band Applications[C]//2017 International Conference on Inventive Computing and Informatics (ICICI). New York: IEEE, 2017: 651-654. DOI: 10.1109/ICICI.2017.8365216.
- [6] ESFAHLANI S H S, TAVAKOLI A, DEHKHODA P. A Compact Single-layer Dual-band Microstrip Antenna for Satellite Applications[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2011, **10**: 931-934. DOI: 10.1109/LAWP.2011.2167121.
- [7] SARIN V P, NASSAR N, DEEPU V, *et al.* Wideband Printed Microstrip Antenna for Wireless Communications [J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2009, **8**: 779-781. DOI: 10.1109/LAWP.2009.2026193.
- [8] 杨晋乾, 王旭光. 一种应用于 5G 的双频微带天线设计[J]. 信息通信, 2020, **33**(6): 83-85. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1131.2020.06.032.
- [9] YANG J Q, WANG X G. Design of a Dual-band Microstrip Antenna for 5G[J]. *Inf Commun*, 2020, **33**(6): 83-85. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1131.2020.06.032.
- [10] LI T, CHEN Z N. Design of Dual-band Metasurface Antenna[C]//2018 International Workshop on Antenna Technology (iWAT). New York: IEEE, 2018: 1-3. DOI: 10.1109/IWAT.2018.8379213.
- [11] LIU W C, WU C M, CHU N C. A Compact CPW-fed Slotted Patch Antenna for Dual-band Operation[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2010, **9**: 110-113. DOI: 10.1109/LAWP.2010.2044135.
- [12] CHEN S Y, HSU P. Broad-band Radial Slot Antenna Fed by Coplanar Waveguide for Dual-frequency Operation[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2005, **53**(11): 3448-3452. DOI: 10.1109/TAP.2005.858574.
- [13] 张智欢. 加载超表面的高增益宽带微带天线的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [14] ZHANG Z H. Study on High Gain Broadband Microstrip Antenna Loaded with Supersurface[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [15] CHANG L, LIU H W. Low-profile and Miniaturized Dual-band Microstrip Patch Antenna for 5G Mobile Terminals[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2022, **70**(3): 2328-2333. DOI: 10.1109/TAP.2021.3118730.
- [16] 王丽黎, 张智欢, 陈俊池. 一种加载超表面结构的宽带天线设计[J]. 微波学报, 2022, **38**(2): 44-47. DOI: 10.14183/j.cnki.1005-6122.202202009.
- [17] WANG L L, ZHANG Z H, CHEN J C. A Wideband Antenna by Loading Metasurface Structure[J]. *J Microw*, 2022, **38**(2): 44-47. DOI: 10.14183/j.cnki.1005-

- 6122.202202009.
- [15] GU Y M, YANG X X, LOU T, *et al.* Low-profile Dual-band Magneto-electric Dipole Antenna Loaded with Metasurface[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2022, **21**(7): 1492–1496. DOI: 10.1109/LAWP.2022.3172320.
- [16] SAMANTARAY D, GHOSH S K, BHATTACHARYYA S. Modified Slotted Patch Antenna with Metasurface as Superstrate for Dual-band Applications[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2023, **22**(1): 109–113. DOI: 10.1109/LAWP.2022.3204180.
- [17] ZHOU C F, YUAN S S, LI H, *et al.* Dual-band Shared-aperture Antenna with Bifunctional Metasurface[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2021, **20**(10): 2013–2017. DOI: 10.1109/LAWP.2021.3102104.
- [18] 师伟春, 王宏建. 基于尺寸渐变超表面宽带高增益低剖面天线[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023, **21**(8): 1007–1013. DOI: 10.11805/TKYDA2021101.
- SHI W C, WANG H J. Broadband High-gain Low-profile Antenna Based on Gradient Size Metasurface[J]. *J Terahertz Sci Electron Inf Technol*, 2023, **21**(8): 1007–1013. DOI: 10.11805/TKYDA2021101.
- [19] QI J R, WANG Q M, DENG F Y, *et al.* Low-profile Uni-cavity High-gain FPC Antenna Covering Entire Global 2.4 GHz and 5 GHz WiFi-bands Using Uncorrelated Dual-band PRS and Phase Compensation AMC [J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2022, **70**(11): 10187–10198. DOI: 10.1109/TAP.2022.3191202.