

## 跨谱域低可探测的电磁超构表面天线\*

郑月军<sup>1,2</sup>, 陈强<sup>1</sup>, 丁亮<sup>1</sup>, 肖科<sup>1</sup>, 钟贇<sup>3,4</sup>, 张贵生<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 电子科学学院, 湖南 长沙 410073; 2. 国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410073;  
3. 中国人民解放军 94040 部队, 新疆 库尔勒 841000; 4. 空军工程大学 装备管理与无人机工程学院, 陕西 西安 710051)

**摘要:**针对低可探测飞行器平台对天线的新需求,提出并设计了微波与红外跨谱域低可探测的电磁超构表面天线。将电磁超构表面设计思想融入天线设计中,在正常辐射下,使其具有电磁超构表面的吸波特性和吸收特性。该设计不用额外加载电磁超构表面,仅利用天线自身结构就能减缩其雷达散射截面。在此基础上,为了实现天线红外低可探测,设计了微波频段透波、红外频段低发射率的电磁超构表面,加载到天线上降低了其发射率。实验结果表明,新设计的电磁超构表面天线工作在 2.72 ~ 2.82 GHz,最大增益达到 6.72 dBi;在 2.70 ~ 2.80 GHz 反射幅度均小于 -10 dB,最小为 -12.49 dB;加载电磁超构表面后天线的发射率为 0.212,与加载前的天线相比降低了 0.334 (61.2%)。新设计的天线在保持正常辐射下,较好地实现了微波与红外低可探测,为低可探测飞行器平台的天线设计提供了新的途径。

**关键词:** 天线;电磁超构表面;微波;红外;低可探测

中图分类号:TN95 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2022)01-022-06

## Metasurface antenna with cross-spectrum and low-observable performance

ZHENG Yuejun<sup>1,2</sup>, CHEN Qiang<sup>1</sup>, DING Liang<sup>1</sup>, XIAO Ke<sup>1</sup>, ZHONG Yun<sup>3,4</sup>, ZHANG Guisheng<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;  
2. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;  
3. The PLA Unit 94040, Korla 841000, China; 4. Equipment Management and Unmanned Aerial Vehicle Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Aiming at the new requirements of antenna for low-observable aircraft platform, metasurface antenna with microwave and infrared cross-spectrum and low-observable performance was proposed and designed. To enable the antenna to possess normal radiation properties and absorbing characteristics simultaneously, a novel idea that metasurface design thought integrated into the antenna design was proposed. In this way, radar cross section of the antenna can be reduced without additional loading of the absorbing metasurface, and only by using absorbing characteristics of the antenna structure. On this basis, to realize infrared low-observable of the antenna, metasurface with microwave transparent characteristics and low emissivity characteristics in the infrared band was designed, and it was loaded above the antenna to reduce antenna emissivity. Experimental results show that the novel designed metasurface antenna operates from 2.72 GHz to 2.82 GHz and the maximum gain reaches 6.72 dBi, which indicates the antenna possesses good radiation properties. The reflection magnitudes of the electromagnetic metasurface antenna are all less than -10 dB from 2.70 GHz to 2.80 GHz. The minimum reflection magnitude is -12.49 dB. The emissivity of the antenna is 0.212 by loading the metasurface, which is 0.334 (61.2%) lower than the antenna without metasurface. From the above results, it can be concluded that the novel designed antenna achieves low-observability of both microwave and infrared simultaneously while maintaining normal radiation properties. The novel metasurface antenna provides a novel approach for antenna design of low-observable aircraft platforms.

**Keywords:** antenna; metasurface; microwave; infrared; low-observable

天线作为低可探测飞行器上的开放电磁窗口,其低可探测性能成为制约飞行器整体低可探测性能提升的瓶颈。天线低可探测的关键是既要保证电磁波的正常辐射和接收,同时又要尽量减

小对入射波的反射,这实际上是很难解决的。电磁超构表面(MetaSurface, MS)是一种影响电磁波传播特性的超薄界面,一般由可任意调控电磁波幅度、相位和极化的周期或非周期人工结构组

\* 收稿日期:2021-01-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61901493, 61901492);湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ5676);湖南省优秀博士后创新人才资助项目(2020RC2048)

作者简介:郑月军(1989—),男,江西上饶人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:zhengyuejun18@nudt.edu.cn

成<sup>[1-5]</sup>。随着电磁超构表面的不断发展,电磁超构表面种类越来越丰富,调控电磁波的功能越来越多样化<sup>[6]</sup>。电磁超构表面为减缩天线雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)提供了新的技术途径。

利用电磁超构表面减缩天线 RCS 的方式主要有两种:一是利用吸波型电磁超构表面的吸波特性和<sup>[7]</sup>,将电磁能量转换成其他形式的能量而耗散掉;二是利用反射型电磁超构表面的同相反射特性<sup>[8]</sup>或者极化旋转特性<sup>[9]</sup>,通过相位对消布阵将威胁空域的雷达波散射到其他空域。曹祥玉教授课题组提出了一种交叉缝隙超薄完美吸波体(Perfect Metamaterial Absorber, PMA)并将其应用于波导缝隙天线,在天线辐射性能基本不受影响的情况下实现了带内 RCS 减缩<sup>[10]</sup>。然而,上述设计需要通过额外增加吸波型电磁超构表面实现天线低可探测,并且电磁超构表面与天线分立设计,两者相互影响,具有不确定性,天线辐射性能或多或少会受到影响,因此加载吸波型电磁超构表面的方法在有效解决天线辐射和低可探测矛盾方面仍面临挑战。并且,目前在天线低可探测方面主要关注微波频段的低可探测,对于其红外低可探测研究较少。要想实现微波与红外的兼容低可探测,根据探测原理,需要电磁超构表面具有对微波频段的探测波高吸收、低反射同时对红外波段的探测波低吸收、高反射的特性<sup>[11-12]</sup>。显然,二者对电磁超构表面的电磁特性要求相互制约,微波与红外兼容低可探测成为制约天线低可探测性能提升的难点之一。

本文针对上述难题,提出将电磁超构表面设计思想融入天线设计中,在天线正常辐射下,使其具有电磁超构表面的吸波特性和。这样不用额外加载吸波型电磁超构表面,仅利用天线自身结构的吸波特性和,就能减缩天线 RCS。在此基础上,针对红外低可探测问题,设计了一种在微波频段具有高透射特性而在红外频段具有高反射(即低发射率)的电磁超构表面,并加载到天线辐射方向上方,利用其微波频段高透射特性,保证天线正常辐射和吸波,实现天线的微波低可探测,同时利用其红外频段高反射特性,使天线具有低红外辐射强度,实现天线的红外低可探测。

## 1 兼具辐射与微波低可探测的天线设计

根据将电磁超构表面融入天线设计的思想,天线与电磁超构表面共用一个结构,因此应选择相似度高的结构。除了馈电结构,贴片天线与贴

片形式的电磁超构表面在结构上高度相似,因此以贴片天线作为研究对象。图1给出了所设计的贴片天线结构,由于在 $x$ 和 $y$ 轴方向均存在馈电结构,为了便于后续的行文描述,定义沿 $x$ 和 $y$ 轴方向的馈电端口分别为端口1和端口2,采用聚四氟乙烯作为天线介质材料,相对介电常数 $\epsilon_r = 3.0$ ,损耗角正切 $\tan\delta = 0.002$ 。利用贴片天线经验设计公式,设计工作频率 $f = 2.8$  GHz的天线结构并进行结构参数优化,优化后参数如表1所示。

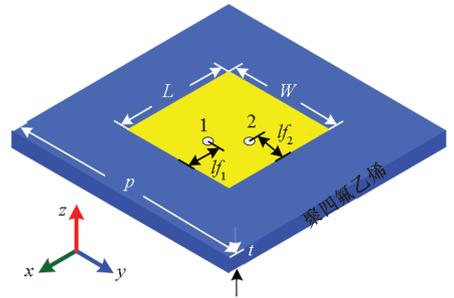


图1 设计的天线结构示意图

Fig. 1 Schematic geometry of the designed antenna

表1 优化后天线结构参数

Tab. 1 Optimized parameters of designed antenna

参数	优化值/mm	参数	优化值/mm
$P$	44.0	$L$	28.4
$W$	28.4	$l_1$	8.6
$l_2$	8.6	$t$	3.0

根据激励源的不同,采用不同的边界。首先,在辐射边界和集总端口激励下,分析了电磁超构表面的辐射特性<sup>[13-14]</sup>。图2给出了天线馈电端口1和端口2的反射系数模值 $|S_{11}|$ 和 $|S_{22}|$ 以及端口1到端口2的传输系数模值 $|S_{21}|$ 。天线两个端口的反射系数模值曲线完全重合,均具有良好的阻抗匹配,在2.77~2.88 GHz频率范围内 $|S_{11}|$ 和 $|S_{22}|$ 均小于-10 dB,并在2.82 GHz产生谐振。从端口1到端口2的传输系数模值曲线可以看出,在天线工作频率范围内, $|S_{21}|$ 均小于-27.9 dB,这说明两个端口之间隔离较好,即当端口1接馈电,端口2接匹配负载时,端口1传输到端口2能量非常小,大部分能量被辐射而不是被端口2吸收。因此,以端口1馈电、端口2接匹配负载为例,观察了天线在谐振频点2.82 GHz的2D辐射方向图,如图3所示,天线朝前向辐射,最大增益达到6.66 dBi,天线最大交叉极化电平比主极化电平低了29.30 dB,由此可知所设计的天线具有较好的辐射性能。

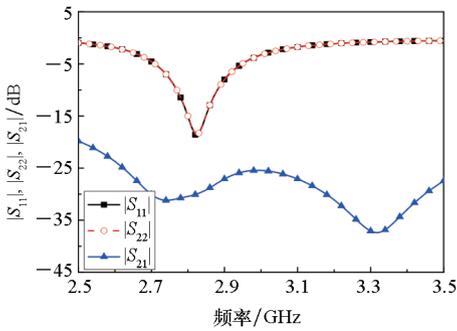
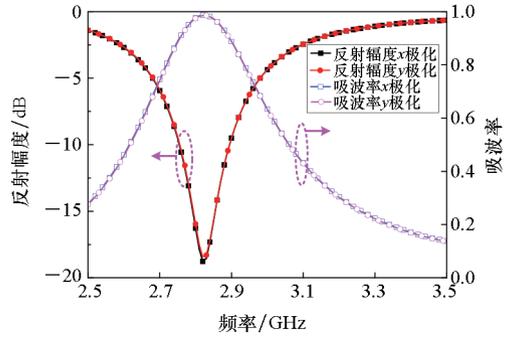
图 2 天线的  $|S_{11}|$ 、 $|S_{22}|$  和  $|S_{21}|$ Fig. 2  $|S_{11}|$ ,  $|S_{22}|$  and  $|S_{21}|$  of the antenna

图 4 天线的反射幅度和吸波率

Fig. 4 Reflection magnitude and absorptivity of the antenna

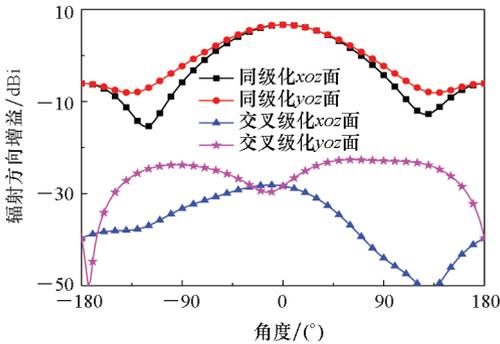


图 3 天线在 2.82 GHz 的辐射方向图

Fig. 3 Radiation patterns of the antenna at 2.82 GHz

在周期边界和 Floquet 端口激励下研究了天线的反射特性<sup>[13-14]</sup>,此时天线两个端口均接匹配负载。图 4 给出了天线反射幅度和吸波率,从图 4 可以看出,在  $x$  和  $y$  两种极化波照射下,天线反射幅度曲线几乎重合,且均有所减小,在 2.76 ~ 2.89 GHz 频率范围内反射幅度均小于 -10 dB,根据吸波率计算公式

$$A = 1 - R = 1 - |S_{11}|^2 \quad (1)$$

可知吸波率均在 90% 以上,最小反射幅度为 -18.42 dB,天线的吸波频带包含其辐射时的工作频带,这说明天线具有较好的吸波效果。天线反射相位如图 5 所示, $x$  和  $y$  两种极化下的反射相位曲线也几乎重合,在 2.81 GHz 处过零点,这说明天线还具有同相反射特性。由上述结果可知,在工作频带范围内,对  $x$  和  $y$  极化入射波均具有较好的吸波特性,即在微波频段具有良好的低可探测效果。为了进一步验证其低可探测效果,研究了天线的 RCS,如图 6 所示,从图中可看出,在天线工作频带内,RCS 有明显的降低,天线具有较好的低可探测性能。

## 2 天线的红外低可探测设计与性能分析

红外低可探测主要是降低目标的红外辐射强度,使其与背景环境相似,从而达到低可探测效

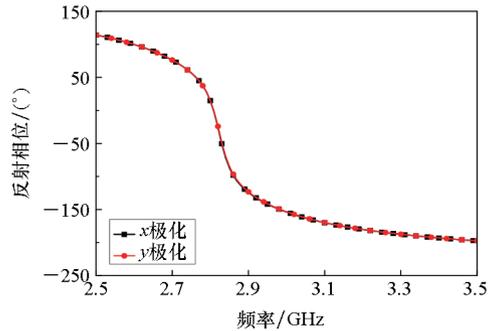


图 5 天线的反射相位

Fig. 5 Reflection phase of the antenna

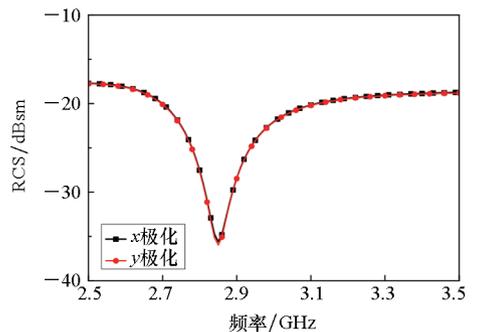


图 6 天线的 RCS

Fig. 6 RCS of the antenna

果。由史提芬-玻尔兹曼定律可得被探测目标红外辐射能量<sup>[15]</sup>为:

$$E_0 = \sigma \varepsilon T^4 \quad (2)$$

式中, $\sigma$  为史提芬-玻尔兹曼常数, $\varepsilon$  为目标的发射率, $T$  为目标的绝对温度。由式(2)可知,在温度一定时,红外低可探测要求目标具有低发射率,从而降低目标的辐射强度。根据基尔霍夫定律可知,在任意  $T$  和波长  $\lambda$  下,不透明热平衡物体的发射率等于其吸波率  $\alpha$ ,即吸波率越少,则发射率越低。很显然,纯金属平板是电磁波的良好反射体,其对红外线几乎是没有吸收的,所以是良好的红外低可探测材料。

基于第1节设计的天线,在微波段具有较好的吸波效果,可知其具有很高的红外发射率。为了降低天线的红外发射率,可在天线上方加载一层低发射率的材料,虽然纯金属平板是良好的红外低可探测材料,但其在微波频段几乎没有任何低可探测效果,且会对天线辐射性能产生巨大影响。针对上述问题,本文提出在天线上方加载一层微波频段高透射、红外频段低发射率的电磁超构表面。受纯金属平板是良好的红外低可探测材料启发,电磁超构表面要具有低发射率,即要电磁超构表面结构拥有尽可能多的金属成分,因此选择贴片结构作为电磁超构表面单元结构,而贴片结构又具有低频透射、高频反射特性,由此可知,贴片形式电磁超构表面设计是解决天线红外低可探测问题的关键。

## 2.1 电磁超构表面设计

根据红外物理特性,电磁超构表面红外发射率可表示为<sup>[16-18]</sup>:

$$\varepsilon = M/M_b \quad (3)$$

其中, $M$ 为电磁超构表面辐射的出射度, $M_b$ 为黑体辐射的出射度,其可表示为:

$$M = \partial P / \partial A \quad (4)$$

其中, $P$ 为辐射功率, $A$ 为物体面积。

实际中电磁超构表面是以某种介质作为支撑板,因此电磁超构表面的辐射功率可表示为:

$$P = P_c / P_d \quad (5)$$

其中, $P_c$ 为电磁超构表面金属部分的辐射功率, $P_d$ 为电磁超构表面介质部分的辐射功率。

联合式(3)~(4)可得电磁超构表面发射率为

$$\varepsilon_{ms} = \varepsilon_c s_c + \varepsilon_d (1 - s_c) \quad (6)$$

式中 $\varepsilon_c$ 和 $\varepsilon_d$ 分别为电磁超构表面中金属以及介质的发射率; $s_c$ 则为金属面积在整个电磁超构表面整个面积中所占的比例。

由式(6)可知,电磁超构表面的发射率与金属及介质的发射率相关,并且受限于金属在电磁超构表面中的占空比。而在温度一定的情况下,金属以及介质的发射率是常数,因此可以通过对金属在电磁超构表面中填充率的调整,改善电磁超构表面整体的发射率,进而改善天线的发射率。综合考量电磁超构表面的微波透波特性以及红外低发射特性,优化设计金属在电磁超构表面中的填充率,实现电磁超构表面设计。

图7给出了所设计贴片形式的电磁超构表面结构,采用聚四氟乙烯作为介质材料, $\varepsilon_r = 3.0$ , $\tan\delta = 0.002$ 。对结构参数进行优化,参数 $p_{ms}$ 、 $t_1$ 、

$L_1$ 优化后的值分别为2.0 mm、0.125 mm、1.8 mm。

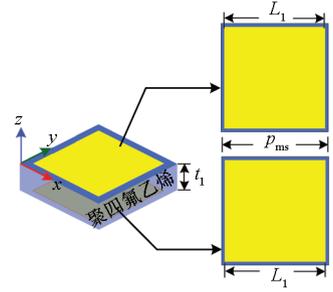


图7 电磁超构表面结构示意图

Fig.7 Schematic geometry of the metasurface

电磁超构表面在微波频段的电磁性能,如图8所示,电磁超构表面的透射系数模值接近于1,反射系数模值均在0.2以下,在天线的工作频段,电磁超构表面的透射系数模值均在0.984以上,具有很好的透射特性。由文献[15-16]可知,聚四氟乙烯覆铜板的聚四氟乙烯塑料发射率一般为0.9,金属铜的发射率一般为0.05,由式(6)计算可得电磁超构表面发射率为0.212。由上述分析可知,电磁超构表面实现了微波高透射特性以及红外低发射特性。

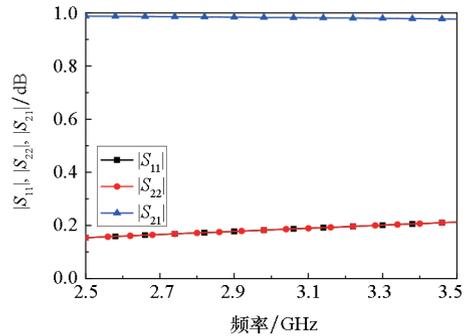


图8 电磁超构表面的 $|S_{11}|$ 、 $|S_{22}|$ 和 $|S_{21}|$

Fig.8  $|S_{11}|$ 、 $|S_{22}|$  and  $|S_{21}|$  of the metasurface

## 2.2 加载电磁超构表面的天线设计与性能分析

将设计的电磁超构表面加载到天线上方,如图9所示,电磁超构表面下表面距天线上表面的高度为 $h$ ,优化后 $h = 1.5$  mm。研究了加载电磁超构表面对天线辐射和反射特性的影响。

首先,在辐射边界和集总端口激励下,分析了电磁超构表面的辐射特性。天线两个端口的反射系数模值和端口与端口间的传输系数模值如图10所示,天线两个端口的反射系数模值曲线完全重合,均具有良好的阻抗匹配,在2.77 GHz产生谐振,并在2.72~2.82 GHz频率范围内 $|S_{11}|$ 和 $|S_{22}|$ 均小于-10 dB,与未加载电磁超构表面的天线相比,天线工作频带略向低频偏移,谐

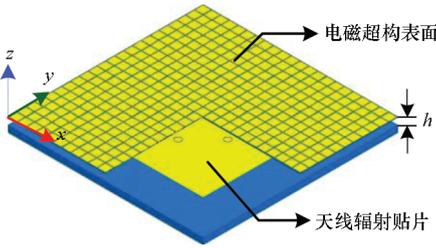


图 9 加载 MS 后天线结构示意图

Fig. 9 Schematic geometry of the antenna with MS

振频率向低频偏移 0.05 GHz。从端口 1 到端口 2 的传输系数模值曲线可以看出,在天线工作频率范围内,  $|S_{21}|$  均小于  $-27.8$  dB,这说明两个端口之间隔离较好。进一步以端口 1 馈电、端口 2 接匹配负载为例,观察了天线在谐振频点 2.77 GHz 的 2D 辐射方向图,如图 11 所示,天线朝前向辐射,最大增益达到 6.72 dBi,与未加载电磁超构表面的天线相比,增益略有提高(0.06 dB),天线最大交叉极化电平比主极化电平低了 28.51 dB,这说明天线具有较好的辐射性能。由上述分析可知,加载超构表面后,对天线辐射性能基本没有影响。

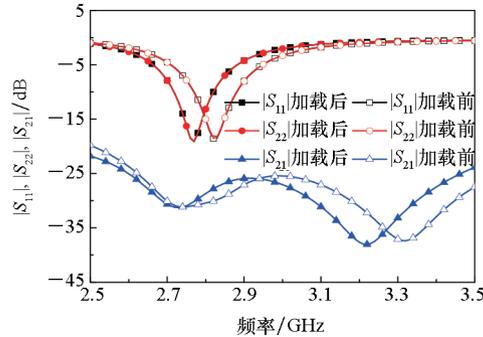


图 10 加载 MS 后天线的  $|S_{11}|$ 、 $|S_{22}|$  和  $|S_{21}|$   
 Fig. 10  $|S_{11}|$ ,  $|S_{22}|$  and  $|S_{21}|$  of the antenna with MS

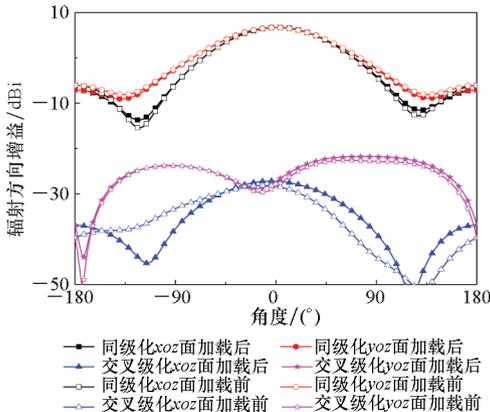


图 11 加载 MS 后天线在 2.77 GHz 的辐射方向图  
 Fig. 11 Radiation patterns of the antenna with MS at 2.77 GHz

在周期边界和 Floquet 端口激励下研究了加载电磁超构表面后天线的反射特性,此时天线两个端口均接匹配负载。天线的反射幅度和吸波率曲线如图 12 所示,在  $x$  和  $y$  两种极化波照射下,天线反射幅度曲线几乎重合,且均有所减小,在 2.70 ~ 2.80 GHz 频率范围内反射幅度均小于  $-10$  dB,最小反射幅度为  $-12.49$  dB,这说明天线仍具有较好的吸波效果。与未加载电磁超构表面的天线相比,天线的吸波频带向低频偏移 0.06 GHz,基本包含其辐射时的工作频带,最小反射幅度提升了 5.93 dB。天线反射相位如图 13 所示, $x$  和  $y$  两种极化下的反射相位曲线也几乎重合,在 2.72 GHz 处过零点,这说明天线仍具有同相反射特性。由上述结果可知,加载电磁超构表面后,天线吸波特性虽略有恶化,但仍保持较好,即在微波频段仍具有良好的低可探测效果。天线的 RCS,如图 14 所示,从图中可看出,在天线工作频带内,RCS 有明显的降低,天线具有较好的低可探测性能,同样也观察到了天线 RCS 减缩带宽向低频偏移,加载电磁超构表面对天线微波低可探测性能影响很小。

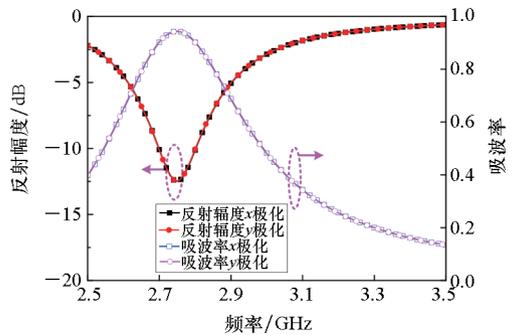


图 12 加载 MS 后天线的反射幅度和吸波率  
 Fig. 12 Reflection magnitude and absorptivity of the antenna with MS

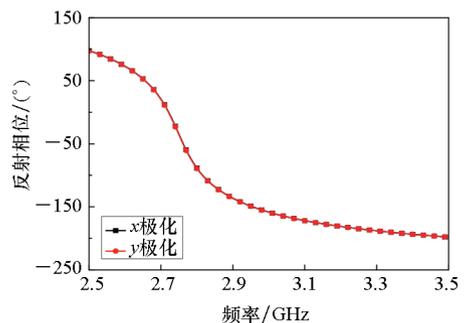


图 13 加载 MS 后天线的反射相位  
 Fig. 13 Reflection phase of the antenna with MS

由式(6)计算未加载电磁超构表面天线的发射率为 0.546,而加载电磁超构表面后天线的发

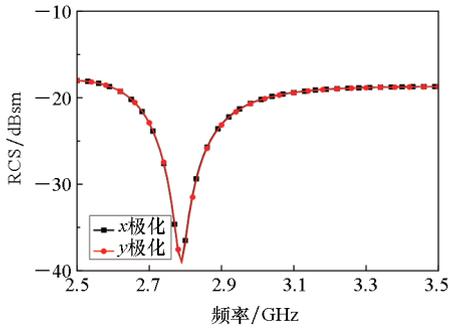


图14 加载MS后的天线RCS

Fig. 14 RCS of the antenna with MS

射率为0.212,加载电磁超构表面后天线的发射率降低了0.334,即61.2%。由上述结果可知,加载电磁超构表面后,在保持正常辐射下,天线较好地实现了微波与红外的兼容低可探测。

### 3 结论

本文针对低可探测飞行器平台对天线的新需求,设计了一种微波/红外低可探测的电磁超构表面天线。提出将电磁超构表面设计思想融入天线设计中,在天线正常辐射下,使其具有电磁超构表面的吸波特性的特性,这样不用额外加载吸波型电磁超构表面,仅利用天线自身结构的吸波特性的特性,就能实现天线微波低可探测。在此基础上,设计了一种微波频段高透射、红外频段低发射率的电磁超构表面,将其加载到天线降低了天线的发射率。实验结果表明,新设计的天线在保持正常辐射下,较好地实现了微波与红外的低可探测,该设计方法为提升天线低可探测性能提供了新的思路。

### 参考文献 (References)

- [1] YANG H H, CAO X Y, YANG F, et al. A programmable metasurface with dynamic polarization, scattering and focusing control[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35692.
- [2] CHEN Q, SANG D, GUO M, et al. Frequency-selective absorber with interabsorption band transparent window and interdigital resonator[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(8): 4105–4114.
- [3] LI Y F, ZHANG J Q, QU S B, et al. Wideband radar cross section reduction using two-dimensional phase gradient metasurfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(22): 221110.
- [4] ZHANG J M, YANG L, LI L P, et al. High-efficiency polarization conversion phase gradient metasurface for wideband anomalous reflection [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(1): 014501.
- [5] ZHANG L, CHEN X Q, SHAO R W, et al. Breaking reciprocity with space-time-coding digital metasurfaces [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(41): 1904069.
- [6] ZHENG Y J, GAO J, ZHOU Y L, et al. Wideband gain enhancement and RCS reduction of fabry-perot resonator antenna with chessboard arranged metamaterial superstrate[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(2): 590–599.
- [7] MEI P, LIN X Q, YU J W, et al. Development of a low radar cross section antenna with band-notched absorber [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(2): 582–589.
- [8] SU J X, KONG C Y, LI Z R, et al. Wideband diffuse scattering and RCS reduction of microstrip antenna array based on coding metasurface [J]. *Electronics Letters*, 2017, 53(16): 1088–1090.
- [9] LI K, LIU Y, JIA Y T, et al. A circularly polarized high-gain antenna with low RCS over a wideband using chessboard polarization conversion metasurfaces [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(8): 4288–4292.
- [10] LIU T, CAO X Y, GAO J, et al. RCS reduction of waveguide slot antenna with metamaterial absorber [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(3): 1479–1484.
- [11] XU C L, WANG B K, YAN M B, et al. An optically transparent sandwich structure for radar-infrared bi-stealth[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 105: 103108.
- [12] ZHONG S M, JIANG W, XU P P, et al. A radar-infrared bi-stealth structure based on metasurfaces [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(6): 063502.
- [13] LIU Y, JIA Y T, ZHANG W B, et al. An integrated radiation and scattering performance design method of low-RCS patch antenna array with different antenna elements [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(9): 6199–6204.
- [14] ZHENG Y J, CAO X Y, GAO J, et al. Integrated radiation and scattering performance of a multifunctional artificial electromagnetic surface [J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 30001–30012.
- [15] 何路. 宽带极化转换与红外/雷达兼容隐身超材料的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [15] HE L. Study on broadband polarization conversion and infrared/radar compatible stealth metamaterials [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [16] 张昌磊. 基于亚波长结构的电磁低散射调控技术研究 [D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2019.
- [16] ZHANG C L. Investigation of electromagnetic low scattering manipulation technology based on subwavelength structure [D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences), 2019. (in Chinese)
- [17] ZHONG S M, WU L J, LIU T J, et al. Transparent transmission-selective radar-infrared bi-stealth structure [J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16466–16476.
- [18] ZHANG C, YANG J, YUAN W, et al. An ultralight and thin metasurface for radar-infrared bi-stealth applications [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(44): 444002.