电波科学学报
Chinese Journal of Radio Science
中文核心期刊要目总览
• 中国科技核心期刊
• 中国科学引文数据库（CSCD）
• 中国科技论文与引文数据库（CSTPCD）
• 中国学术期刊文摘数据库（CSAD）
• 中国学术期刊（网络版）（CNKI）
• 中文科技期刊数据库
• 万方数据知识服务平台
• 中国超星期刊域出版平台
• 国家科技学术期刊开放平台
• 荷兰文摘与引文数据库（SCOPUS）
• 日本科学技术振兴机构数据库（JST）

一种双宽带雷达散射截面减缩的超表面设计方法

王维婧，史　琰，孟赞奎，孟浩轩

A metasurface design method for dual wide band radar cross section reduction

WANG Weijing, SHI Yan, MENG Zankui, and MENG Haoxuan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12265/j.cjors.2021073

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于极化旋转单元的宽带雷达散射截面缩减
Wideband RCS reduction based on polarization conversion unit cell
电波科学学报. 2019, 34(1): 126–132

基于组合梯度超表面的低RCS微带天线设计
Design of low RCS microstrip antenna based on combinatorial gradient metasurface
电波科学学报. 2018, 33(4): 441–446

基于相位梯度表面的缝隙阵列天线宽带RCS减缩
Wideband radar cross section reduction of slot antenna array with phase–gradient metasurface
电波科学学报. 2018, 33(3): 330–336

非谐振多层级联频率选择表面研究
Non–resonant multilayer cascading of frequency selective surface
电波科学学报. 2018, 33(4): 463–469

基于滤波器电路设计多层带通频率选择表面
Design of multilayer band–pass frequency selective surface based on filter circuit
电波科学学报. 2019, 34(2): 145–151

基于频率选择表面的宽角扫描阵列
Wide–angle scanning array based on frequency selective surface
电波科学学报. 2018, 33(3): 301–310

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王维婧, 史琰, 孟赞奎, 等. 一种双宽带雷达散射截面减缩的超表面设计方法[J]. 电波科学学报, 2021, 36(6): 887-895. DOI: 10.12265/j.cjors.2021073
WANG W J, SHI Y, MENG Z K, et al. A metasurface design method for dual wide band radar cross section reduction[J]. Chinese journal of radio science, 2021, 36(6): 887-895. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2021073

一种双宽带雷达散射截面减缩的超表面设计方法

王维婧[1] 史琰[1,2] 孟赞奎[1] 孟浩轩[1]
（1. 西安电子科技大学电子工程学院, 西安 710071; 2. 人工智能与数字经济广东省实验室 智能超材料中心, 广州 510330）

摘 要 超表面由于其灵活的电磁波调控能力而受到广泛关注, 基于其在雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 减缩设计中受限于工作频带单一、设计通用性低的问题, 文中提出一种新型的叠层型超表面设计方法, 来灵活实现双宽带的 RCS 减缩. 首先设计了工作在两个频带且具有极化旋转特性的超表面结构及低通频率选择表面 (frequency selective surface, FSS), 并将其与两个极化旋转超表面相集成, 形成了具有双频带极化旋转特性的超表面结构; 然后基于极化相消原理, 将该阵列进行旋转排布, 形成 2×2 的阵列结构, 以实现在 6.6～12.7 GHz 和 27.8～38.1 GHz 两个频带内−10 dB 的 RCS 减缩. 对所设计的超表面结构进行实物加工, 实测结果与仿真结果对比吻合良好, 从而验证了双带 RCS 减缩的良好特性.

关键词 双频带; 雷达散射截面 (RCS) 减缩; 极化旋转; 超表面; 频率选择表面 (FSS)
中图分类号 TN82 **文献标志码** A **文章编号** 1005-0388(2021)06-0887-09
DOI 10.12265/j.cjors.2021073

A metasurface design method for dual wide band radar cross section reduction

WANG Weijing[1] SHI Yan[1,2] MENG Zankui[1] MENG Haoxuan[1]
（1. *School of Electronic Engineering*, *Xidian University*, *Xi'an* 710071, *Shaanxi*, *China*;
2. *Intelligent metamaterical center*, *Pazhou Lab*, *Guangzhou*, 510330, *China*）

Abstract Metasurface has attracted much attentions due to its ability of flexible manipulation of electromagnetic wave. However, the metasurface is limited to the single operating band and poor design generality when it is used for radar cross section (RCS) reduction. In this paper, a stacked metasurface design method has been developed to flexibly achieve dual wide band RCS reduction. Two subarrays with polarization conversion characteristic are firstly designed to operate in two wide bands, respectively. Then a low-pass frequency selective surface (FSS) is developed and sandwiched between two metasurface subarrays to achieve a subarray with the dual-band polarization conversion performance. With the arrangement of the dual-band subarray into a 2×2 array in a rotation way according to the polarization cancellation, the resultant metasurface structure has two −10 dB RCS reduction bands covering 6.6−12.7 GHz and 27.8−38.1 GHz. The designed prototype is fabricated and measured. The simulation and measurement results are given to demonstrate the good dual-band RCS reduction performance.

Keywords dual-band; radar cross section (RCS) reduction; polarization conversion; metasurface; frequency selective surface (FSS)

收稿日期: 2021-03-24
资助项目: 国家自然科学基金(61771359)
联系人: 史琰 E-mail: shiyan@mail.xidian.edu.cn

引 言

雷达目标的低可探测性对于隐身平台至关重要. 为了避免被雷达探测发现, 雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 的减缩技术成为了国内外的研究热点之一. 目前为止, 各种目标的 RCS 减缩技术相继被提出[1-21]. 目标外形优化方法作为一种最常用的降低目标 RCS 的方法, 通过改变目标的外部形状, 入射波能够被目标散射到除入射方向以外的其他方向上. 但目标外形的变化通常会引起其他性能的改变, 如气动性能的恶化. 吸波材料是另一种常用于降低 RCS 的方法[1], 近年来基于超构材料的吸波结构能够实现近乎理想的吸波特性[2]. 通过合理的超构材料设计, 使其等效阻抗近似等于自由空间的波阻抗, 从而入射波能够无反射地进入到吸波结构中; 同时吸波结构中的有耗电介质[3-4]、有耗磁介质[5-6]、阻抗型表面[7-8] 和集总电阻[9-10] 等损耗材料进一步将入射波的电磁能量消耗掉并转换为热. 吸波材料的使用对目标会造成一定的负面影响, 如应用在天线的周围会造成其辐射性能的恶化.

近年来一些无耗的超表面结构被提出用于实现目标的 RCS 减缩. 基于相位相消的原理, 由两种相位近似相差 180°的结构组成棋盘阵列可以实现后向散射波的抵消, 例如电磁带隙结构 (electromagnetic band gap, EBG) 与理想导体构成的棋盘结构[11], 人工磁导体 (artificial magnetic conductor, AMC) 和理想导体构成的棋盘结构[12], 两种 AMC 构成的棋盘结构[13-14] 等. 作为棋盘式结构的一种通用情况, 具有合理排布 0 单元和 1 单元的 1 比特超表面能够实现电磁波的漫散射特性, 进而实现 RCS 的减缩[15-16]. 此外, 一些具有极化旋转特性的超表面也被提出用于目标的 RCS 减缩[16-21]. 将极化旋转超表面旋转 90°后所得的结构与原超表面结构之间具有 180°的反射相位差, 因此将极化旋转超表面旋转排布组阵就能够实现极化相消, 从而达到低 RCS 特性. 目前基于极化相消技术设计的超表面可以在某个较宽的频带内实现低 RCS 的特性, 但一旦超表面结构设计确定, 其对应的减缩频带也相应地固定. 若要改变 RCS 减缩的工作频带, 需要对超表面结构进行重新的优化设计, 因此设计的通用性大大受限.

频率选择表面 (frequency selective surface, FSS) 是一种由相同单元组成的二维阵列结构, 可看作一种超表面结构[22-25]. 由于其具有高通、低通、带通和带阻等灵活的频率响应特性, 已成为一个广泛研究的课题. 本文首次提出一种基于 FSS 的双带极化旋转超表面设计方法, 通过将低通的 FSS 和两个极化旋转超表面阵列相集成, 所得的阵列具有双带的极化旋转特性; 进一步将得到的阵列进行旋转排布布阵, 从而实现双带的低 RCS 特性. 仿真与实测结果表明所设计的结构在 6.6～12.7 GHz 和 27.8～38.1 GHz 两个频带实现了−10 dB 的 RCS 减缩.

1 基于 FSS 的超表面设计

1.1 极化旋转超表面设计

文中首先设计具有极化旋转特性的超表面结构来实现低 RCS 特性. 图 1 为极化旋转超表面单元, 由一个金属贴片和金属地板组成. 该金属贴片沿着 φ=−45°印制在相对介电常数为 2.2、厚度为 1.7 mm 的电介质的上表面, 一个厚度为 3 mm 的空气层位于金属地板与介质之间, 单元的周期为 6 mm×6 mm. 一组主从边界包围该单元, 使用 Floquet 端口对该单元进行激励来仿真由该单元所组成的无限大超表面阵列, 如图 1(a) 所示. 两个均匀平面波垂直入射到无限大阵列上, φ=−45°极化方向的入射电场分量记为 E_u^{inc}, φ=45°极化方向的入射电场分量记为 E_v^{inc}, 如图 1(b) 所示. 两种入射波情况下, 反射系数 S_{11} 的共极化分量幅度接近 1, 且远大于对应的交叉极化分量. 说明两种情况下反射波的电场极化 ($E_u^{\mathrm{ref}}/E_v^{\mathrm{ref}}$) 与入射波的电场极化 ($E_u^{\mathrm{inc}}/E_v^{\mathrm{inc}}$) 保持一致, 同时反射波电场的幅度与入射波电场的幅度近似相等, 如图 2(a) 所示. 另一方面, 图 2(b) 给出了两种入射波情况下反射系数 S_{11} 的相位. 可以看到, 在 16.4～34.5 GHz 的频带内, 两种情况下反射系数的相位差近似为 180°.

不失一般性, 假设一个 x 极化的入射波照射到该阵列上, 则入射电场 $\boldsymbol{E}^{\mathrm{inc}}$ 被分解为沿着 φ=−45°和 φ=45°两极化方向电场的叠加, 即

$$\boldsymbol{E}^{\mathrm{inc}} = E_u^{\mathrm{inc}}\boldsymbol{u} + E_v^{\mathrm{inc}}\boldsymbol{v}, \tag{1}$$

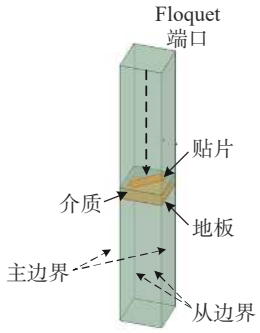
对应的反射电场 $\boldsymbol{E}^{\mathrm{ref}}$ 可求解为

$$\boldsymbol{E}^{\mathrm{ref}} = S_{11}^{u}E_u^{\mathrm{inc}}\boldsymbol{u} + S_{11}^{v}E_v^{\mathrm{inc}}\boldsymbol{v}. \tag{2}$$

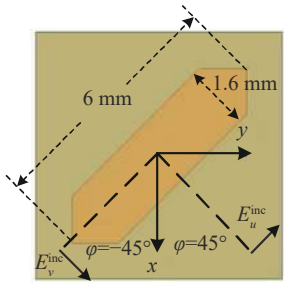
式中, S_{11}^{u}和S_{11}^{v}为上述两种入射情况下的反射系数. 从图 2 可知, 频带 16.4～34.5 GHz 内, S_{11}^{u}=−S_{11}^{v}. 因此式 (2) 可以改写为

$$\boldsymbol{E}^{\mathrm{ref}} = S_{11}^{u}(E_u^{\mathrm{inc}}\boldsymbol{u} - E_v^{\mathrm{inc}}\boldsymbol{v}). \tag{3}$$

根据式 (3) 可知: 对于具有 x 极化的入射电场而言, 反射电场的方向沿 y 方向; 由于结构的对称性, y 极化的入射波入射, 可以得到 x 极化的散射波. 从而表明所设计的阵列具有极化旋转的特性.



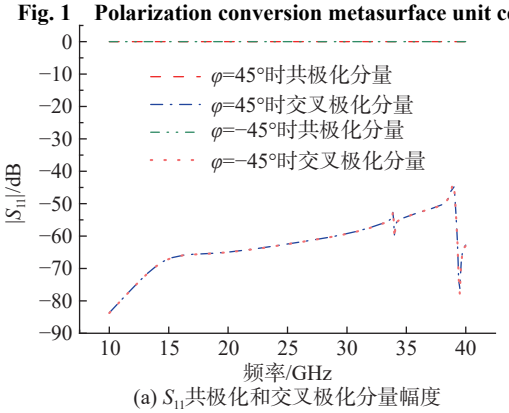
(a) 由主从边界包围 Floquet 端口激励的单元
(a) The unit cell enclosed by the master-slave boundaries and excited by the Floquet port



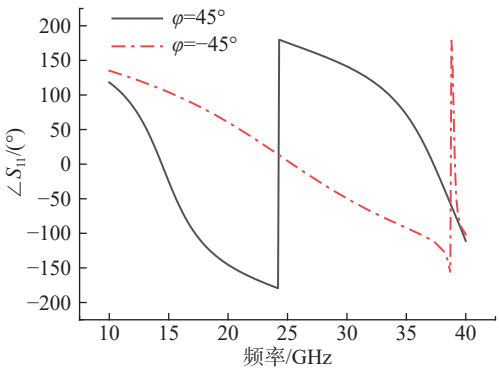
(b) 单元俯视图
(b) Top view of unit cell

图 1　极化旋转超表面单元

Fig. 1　Polarization conversion metasurface unit cell



(a) S_{11}共极化和交叉极化分量幅度
(a) Magnitudes of co- and cross-polarized components of S_{11}



(b) S_{11}共极化分量相位
(b) Phases of co-polarized components of S_{11}

图 2　均匀平面波沿两个方向入射到无限大超表面阵列的 S_{11}

Fig. 2　Incidence of the plane waves in 2 directions of S_{11} on the infinite periodic array

1.2　FSS 设计

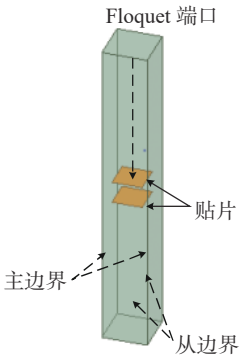
文中设计了一个低通的 FSS 来实现双带响应, 如图 3(a) 所示, FSS 单元是由两层等尺寸的金属贴片构成, 一个空气层位于两层金属贴片之间. 利用等效电路的方法设计 FSS 的低通响应, 上层和下层的金属贴片等效为并联电容 C_1 和 C_3, 中间的空气层可以等效为一个并联的 LC 谐振器, 即 L 和 C_2, FSS 结构的上半空间和下半空间可以用空间的特性阻抗 Z_{01} 和 Z_{02} 来表征. 由于上半空间和下半空间都为空气, 所以 Z_{01}=Z_{02}≈377 Ω. 整个 FSS 结构的等效电路如图 3(b) 所示. 等效电路中的各个集总参量的初始值都能用解析公式[21] 求得:

$$C_1 = C_3 = \varepsilon_0 \frac{2D}{\pi} \ln \frac{1}{\sin \dfrac{\pi s}{2D}}; \tag{4}$$

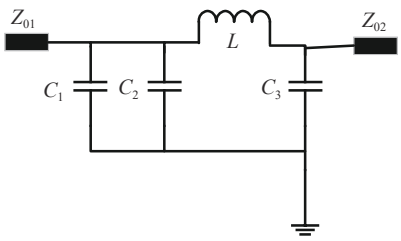
$$L = \mu_0 h; \tag{5}$$

$$C_2 = \varepsilon_0 h. \tag{6}$$

式中: FSS 结构周期 D=6 mm; 每层中两个相邻贴片间距 s=2 mm; 空气层厚度 h=3 mm. 将结构的几何参数代入式 (4)～(6) 来确定初始的等效电路集总参量, 并利用 ADS 软件进一步优化, 即可获得等效电路中最终的参量值, 如表 1 所示. FSS 结构全波仿真和等效电路计算得到的 S 参数对比结果如图 4 所示, 可以看出两者吻合良好, 说明所提出的 FSS 结构具有低通的频率响应.



(a) 主从边界包围的 FSS 单元
(a) FSS unit cell enclosed by master-slave boundaries



(b) FSS 结构的等效电路
(b) Equivalent circuit of FSS structure

图 3　低通 FSS 结构

Fig. 3　The low-pass FSS structure

表 1 FSS 结构等效电路集总参数

Tab. 1 Lumped parameters of equivalent circuit of FSS structure

C_1	C_2	C_3	L	Z_{01}	Z_{02}
32 fF	0.23 fF	32 fF	3.3 nH	377 Ω	377 Ω

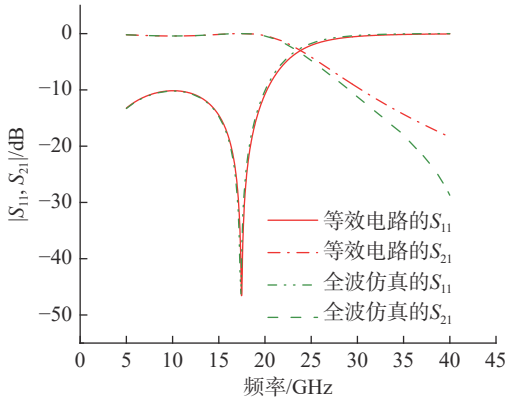


图 4 低通 FSS 结构等效电路与全波仿真所得 S 参数对比

Fig. 4 Comparison of S parameters of the FSS structure between the equivalent circuit and full-wave simulation.

将低通 FSS 结构与极化旋转超表面结构进行集成，即将 FSS 结构的第一层印制在极化旋转超表面介质的背面以取代极化旋转超表面的地板. 图 5 为集成后结构的 S_{11} 共极化和交叉极化分量的仿真结果. 可以看出，在 27.7～37.9 GHz 频带内，S_{11} 的交叉极化分量比共极化分量高 10 dB 以上，说明集成后的结构具有良好的极化旋转特性. 图 6 给出了集成后结构的反射系数 S_{11} 和传输系数 S_{21} 的仿真结果. 可以看出集成后的结构在低频段仍具有良好的传输特性，为获得双带极化旋转特性打下基础.

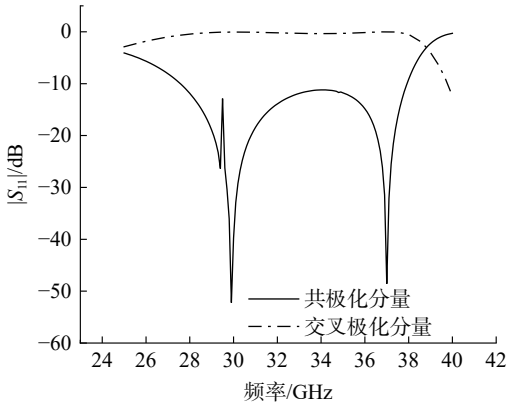


图 5 集成后结构 S_{11} 共极化和交叉极化分量对比

Fig. 5 Co-polarized and cross-polarized components of the S_{11} when integrating the FSS structure and the metasurface array with the polarization conversion characteristic

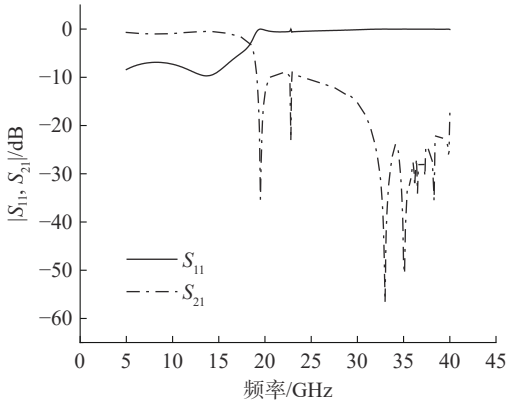


图 6 集成后结构 S_{11} 和 S_{21} 仿真结果

Fig. 6 S parameters when integrating the FSS structure S_{11} and S_{21}

2 双带极化旋转超表面设计

基于 1.2 节的设计过程，设计了一个双带极化旋转超表面结构，其三维结构如图 7 所示. 一个高频极化旋转超表面结构印制在 F4B 介质 (相对介电常数为 2.2) 的上表面，一个低频极化旋转超表面印制在 FR4 介质 (相对介电常数为 4.4) 的下表面. 高频极化旋转超表面为 12×12 的子阵列，低频极化旋转超表面为 6×6 的子阵列. 低通 FSS 结构上层贴片印制在 F4B 介质的下表面，FSS 结构下层贴片印制在 FR4 介质的上表面. 一个金属板放置在距下层介质 6 mm 处，整体结构的侧视图和俯视图如图 8(a) 和 (b) 所示. 图 8(c) 分别给出了低频和高频极化旋转单元以及 FSS 单元的结构. 表 2 列出了双带极化旋转超表面结构的详细尺寸. 图 9 为极化旋转超表面结构在 5～15 GHz 和 20～40 GHz 两个频带反射系数的共极化分量和交叉极化分量. 可以看出在 6.5～12.3 GHz 和 26.8～38 GHz 的两个频带内，交叉极化分量比共极化分量高出 10 dB. 图 10 为极化旋转超表面结构在两个频带中的极化旋转率，极化旋转率为交叉极化分量与总分量的比值. 可以看出在 6.2～12.5 GHz 和 25.9～38.3 GHz 的两个频带内极化旋转率均大于 0.9，说明在双频带内实现了良好的极化旋转特性.

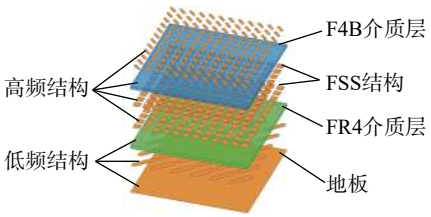


图 7 双带极化旋转超表面三维结构

Fig. 7 The proposed 3D dual-band structure with the polarization conversion

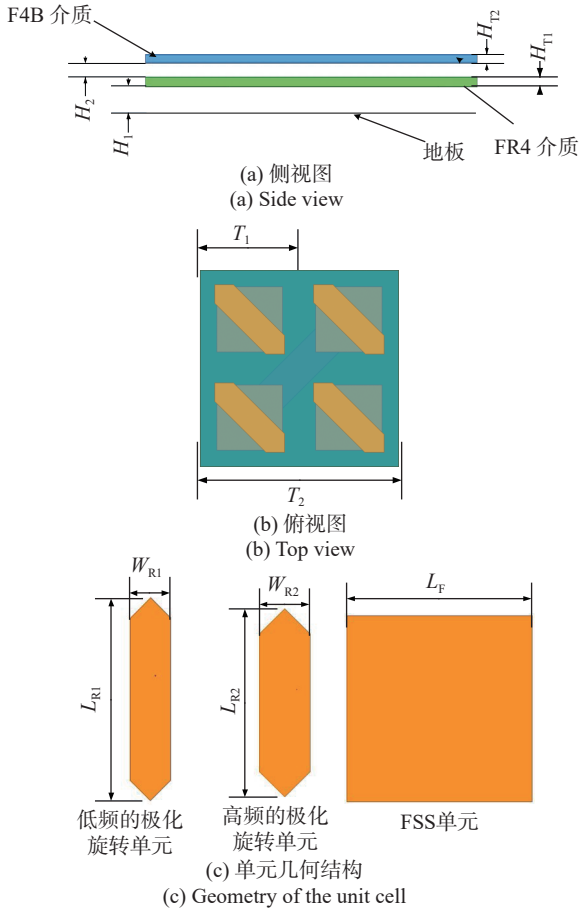


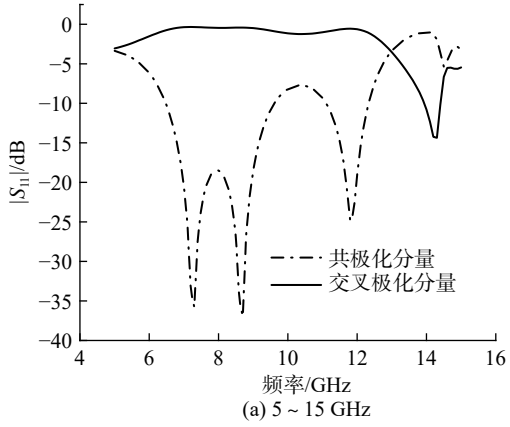
图 8　双带极化旋转超表面

Fig. 8　Dual-band metasurface with polarization conversion characteristic

表 2　双带极化超表面结构的几何参数

Tab. 2　Geometric parameters of dual-band polarization metasurface structure　　**mm**

T_1	T_2	L_{R1}	W_{R1}	L_{R2}	W_{R2}
12	6	16	3.2	6	1.6
L_F	H_1	H_2	H_{T1}	H_{T2}	
4	6	3	2	1.7	



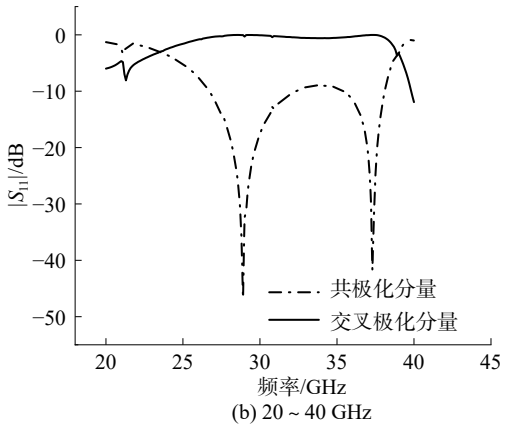


图 9　双带极化旋转超表面两个频带反射系数的共极化和交叉极化分量

Fig. 9　Co-polarized and cross-polarized components of S parameter of the proposed dual-band metasurface structure

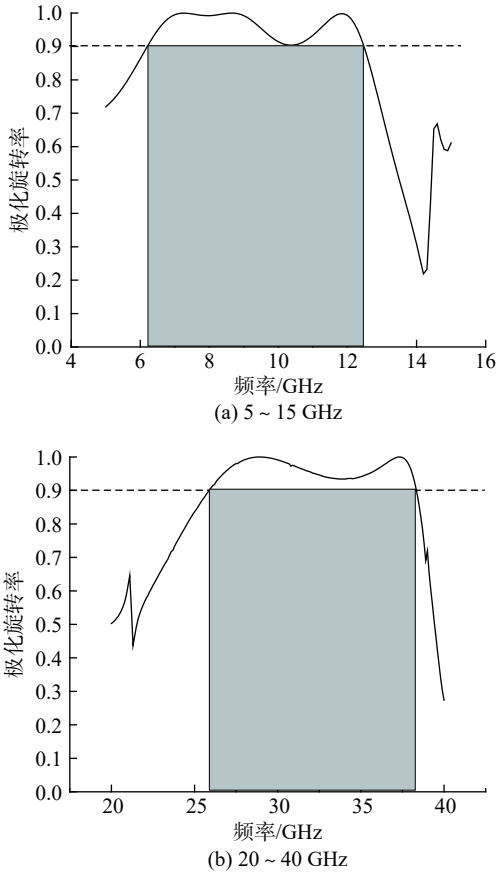


图 10　双带极化旋转超表面两个频带内的极化旋转率

Fig. 10　Polarization conversion ratio of the proposed dual-band metasurface structure

从上述设计过程可以看出，双带极化旋转超表面设计方法能够很容易扩展到不同的工作频带. 如保持高频极化旋转超表面和 FSS 几何尺寸不变，通过改变低频极化旋转超表面结构的几何尺寸，即可

实现低极化旋转频带的改变. 图 11 为新双带极化旋转超表面单元结构俯视图, 低频极化旋转单元几何尺寸改为: L_{R1}=25 mm, W_{R1}=2.8 mm, T_2=18 mm, 其他几何尺寸与双带极化旋转超表面的几何尺寸保持一致. 图 12 和 13 分别为新双带极化旋转超表面在 2～9 GHz 和 25～40 GHz 两个频带内反射系数的共极化和交叉极化分量以及对应的极化旋转率. 可以看出在 2.2～5.7 GHz 和 26.1～38.3 GHz 两个频带内, 新双带极化旋转超表面的极化旋转率大于 0.9, 实现了良好的极化旋转特性. 对比双带极化旋转超表面的极化旋转频带可知, 新设计的超表面其高极化旋转频带有所展宽, 但总体保持不变, 而低极化旋转频带明显向低频偏移. 尽管目前单一频带极化旋转超表面设计方法能够实现较宽的极化旋转带宽[25], 但其结构设计一旦确定, 其极化旋转的工作频带也相应确定, 若需要改变其极化旋转频带, 则必须重新优化设计整个极化旋转结构, 因此其设计通用性较差. 本文所提出的双带极化旋转超表面设计方法能够更加灵活地实现极化旋转频带的操控, 从而大大简化了设计的复杂度.

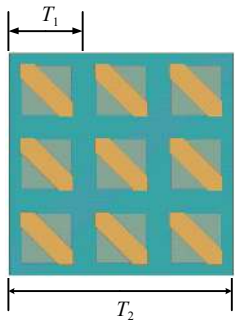
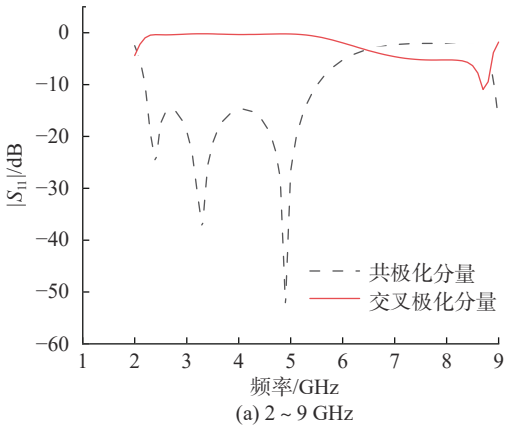


图 11 新双带极化旋转超表面结构俯视图

Fig. 11 New dual-band metasurface with polarization conversion characteristic



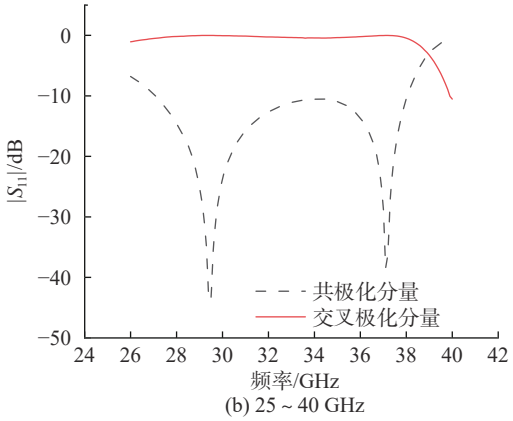


图 12 新双带极化旋转超表面两个频带反射系数的共极化分量和交叉极化分量

Fig. 12 Co-polarized and cross-polarized components of S parameter of the newly proposed dual-band metasurface structure

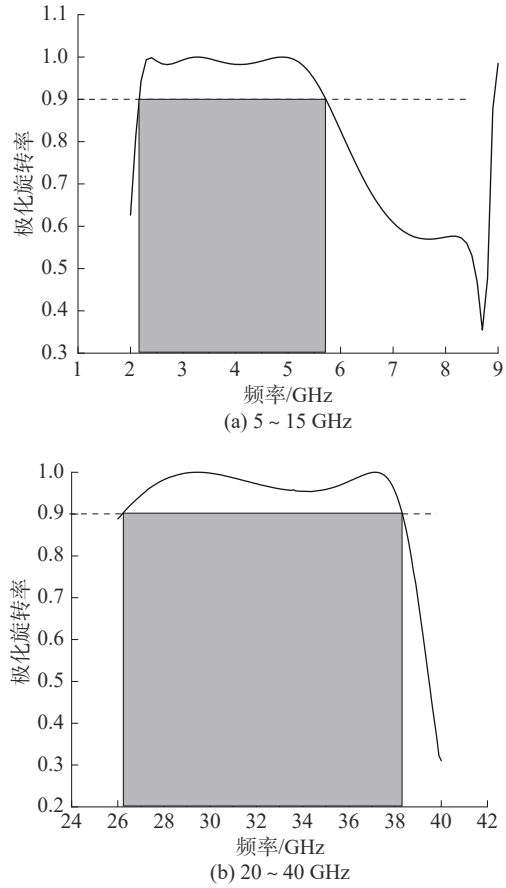


图 13 新双带极化旋转超表面两个频带的极化旋转率

Fig. 13 Polarization conversion ratio of the newly proposed dual-band metasurface structure

将双带极化旋转超表面进行旋转排布获得一个 2×2 的阵列来实现 RCS 减缩特性, 如图 14 所示. 双带极化旋转超表面子阵列和其旋转 90°后子阵列的反射相位相差 180°, 从而由极化相消原理可知, 将两

者排列成 2×2 的超表面阵列结构能够在双频带内实现 RCS 的减缩特性. 对该结构进行加工，其实物及 RCS 测试环境如图 15 所示.

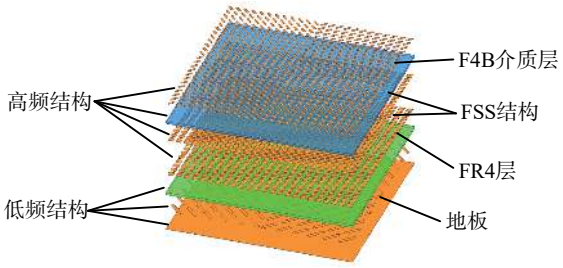


图 14　双带 RCS 减缩超表面三维结构

Fig. 14　The proposed dual-band 3D structure for RCS reduction

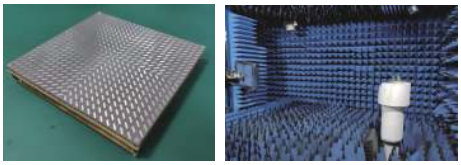


图 15　双带 RCS 减缩超表面实物及 RCS 测试环境

Fig. 15　The fabricated metasurface prototype and its RCS measurement environment

图 16 为超表面结构和同尺寸金属板后向 RCS 仿真和实测结果对比. 可以看出，在 6.1～11.7 GHz 和 28.2～36.6 GHz 中，实测超表面结构比同尺寸金属板后向 RCS 小 10 dB 以上. 仿真−10 dB RCS 减缩的频带为 6.6～12.7 GHz 和 27.8～38.1 GHz，实测与仿真结果基本保持一致.

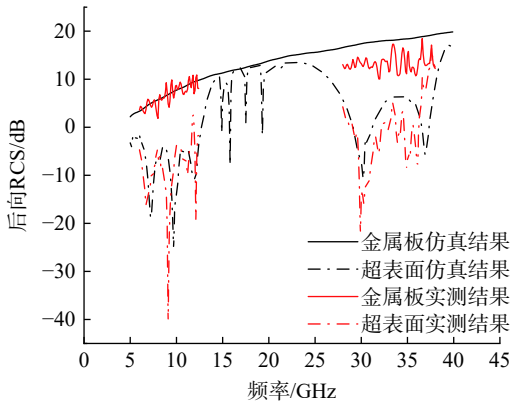


图 16　两种结构后向 RCS 仿真和实测结果

Fig. 16　Measured backscattering RCS of the proposed dual-band metasurface structure

图 17 为双带 RCS 减缩超表面结构与同尺寸金属板在 10 GHz 和 30 GHz 斜入射情况下 φ=0°平面内双站 RCS 仿真结果. 可以看出，当入射波的俯仰角为 θ=−10°、θ=−20°、θ=−30°时，金属板将会在 θ=10°、θ=20°、θ=30°产生一个强的镜面散射波束，超表面结构能够明显地减弱散射波的波束强度，从而实现 RCS 的减缩.

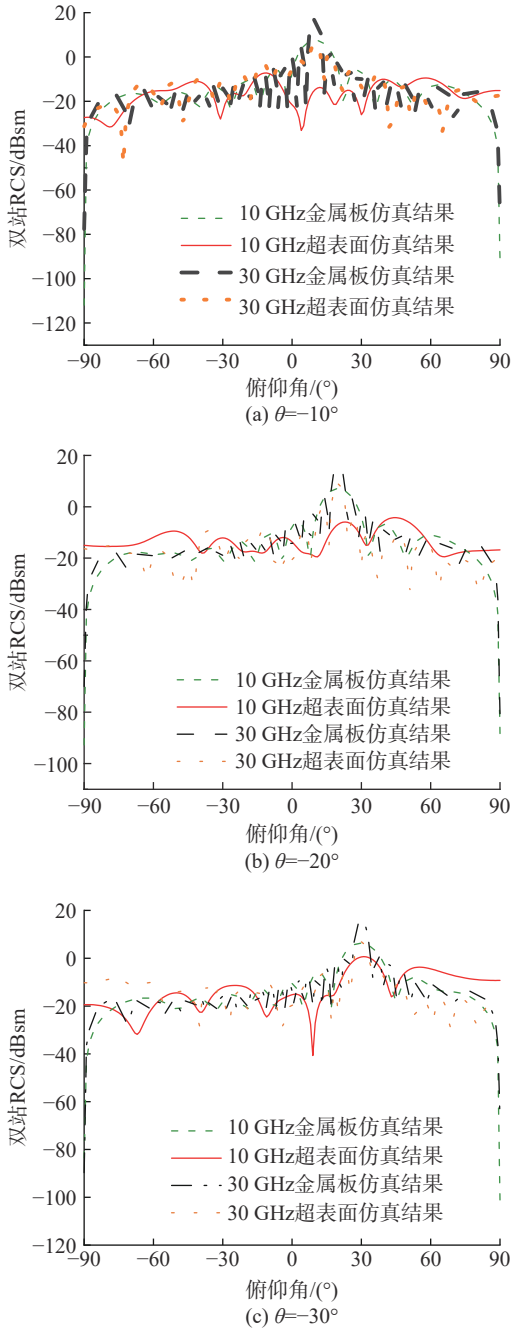


图 17　10 GHz 和 30 GHz 斜入射平面波照射下的双站 RCS

Fig. 17　Bistatic RCS of the oblique plane waves at 10 GHz and 30 GHz

3　结　论

本文提出了一种叠层型的超表面结构设计方法来实现双带目标 RCS 减缩，设计了高频段和低频段两个极化旋转超表面阵列，以及一个低通的 FSS. 将

三个结构集成在一起，形成了双带极化旋转超表面阵列，并将该阵列进行旋转排布成 2×2 的结构，以实现双带低 RCS 特性. 文中实测和仿真结果吻合良好，显示所提出的超表面结构在 6.6～12.7 GHz 和 27.8～38.1 GHz 两个频带内具有−10 dB 的 RCS 减缩性能. 文中所提出的设计方法能够灵活地操控两个不同的极化旋转频带，从而适用于具有双可调频带的低 RCS 特性应用场景.

参考文献

[1] SALISBURY W W. Absorbent body for electromagnetic waves: U. S. Patent 2599944 [P], 1952.

[2] SHI Y, ZHANG Y. Design of graphene-based metamaterial absorber and antenna in metamaterials and metasurface[M]. IntechOpen, 2019: 171-912.

[3] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J. et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical review letters, 2008, 100: 207402.

[4] LI L, YANG Y, LIANG C H. A wide-angle polarization-insensitive ultra-thin metamaterial absorber with three resonant modes[J]. Journal of applied physics, 2011, 110: 063702.

[5] SHI Y, YANG J, SHEN H, et al. Design of broadband metamaterial-based ferromagnetic absorber[J]. Materials science: advanced composite materials, 2018, 2: 1-7.

[6] LI W, WU T, WANG W, et al. Broadband patterned magnetic microwave absorber[J]. Journal of applied physics, 2014, 116: 044110.

[7] ZHANG Y, SHI Y, LIANG C H. A broadband tunable graphene-based metamaterial absorber[J]. Optics material express, 2016, 6: 3036-3044.

[8] ZHANG L, SHI Y, YANG J X, et al. Broadband transparent absorber based on indium tin oxide-polyethylene terephthalate film[J]. IEEE access, 2019, 7: 137848-137855.

[9] SHI Y, LI Y C, HAO T, et al. A design of ultra-broadband metamaterial absorber[J]. Waves in random and complex media, 2017, 27: 381-391.

[10] COSTA F, MONORCHIO A, MANARA G. Analysis and design of ultra thin electromagnetic absorbers comprising resistive loaded high impedance surfaces[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2010, 58: 1551-1558.

[11] CHEN W, BALANIS C A, BIRTCHER C R. Checkerboard EBG surfaces for wideband radar cross section reduction[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2015, 63: 2636-2645.

[12] ZHENG Y, GAO J, CAO X Y, et al. Wideband RCS reduction of a microstrip antenna using artificial magnetic conductor structures[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2015, 14: 1582-1585.

[13] MODI A Y, BALANIS C A, BIRTCHER C R, et al. Novel design of ultrabroadband radar cross section reduction surfaces using artificial magnetic conductors[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2016, 65: 5406-5417.

[14] SHI Y, MENG Z K, WEI W Y, et al. Characteristic mode cancellation method and its application for antenna RCS reduction[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2019, 18: 1784-1788.

[15] HAN J F, CAO X Y, GAO J, et al. Broadband radar cross section reduction using dual-circular polarization diffusion metasurface[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2018, 17: 969-973.

[16] ORUJI A, PESARAKLOO A, KHALAJ-AMIRHOSSEINI M. Ultrawideband and omnidirectional RCS reduction by using symmetrical coded structures[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2020, 19: 1236-1240.

[17] LIU Y, LI K, JIA Y, et al. Wideband RCS reduction of a slot array antenna using polarization conversion metasurfaces[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2016, 64: 326-331.

[18] LI K, LIU Y, JIA Y, 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: 4288-4292.

[19] SHI Y, ZHANG X F, MENG Z K, et al. Design of low-RCS antenna using antenna array[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2019, 67: 6484-6493.

[20] MENG Z K, SHI Y, WEI W Y, et al. Multifunctional scattering antenna array design for orbital angular momentum vortex waves and RCS reduction[J]. IEEE access, 2020, 8: 109289-109296.

[21] JIA Y T, LIU Y, ZHANG W B, et al. Ultra-wideband and high-efficiency polarization rotator based on metasurface[J]. Applied physics letters, 2016, 109: 051901.

[22] AL-JOUMAYLY M, BEHDAD N. A new technique for design of low-profile, second-order, bandpass frequency selective surfaces[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2009, 57: 452-459.

[23] LI B, SHEN Z. Three-dimensional bandpass frequency selective structures with multiple transmission zeros[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2013, 61: 3678-3589.

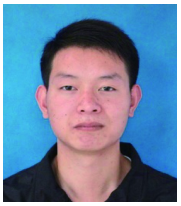
[24] HONG T, PENG K, WANG M D. Miniaturized frequency selective surface using handshake convoluted strip[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2019, 18: 2026-2030.

[25] XUE K, ZHAI H Q, LI S C, et al. A miniaturized absorber frequency selective surface with good angular stability[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2020, 19: 24-28.

作者简介



王维婧　(1992—), 女, 陕西人, 西安电子科技大学硕士研究生, 研究方向为超表面和天线.



孟赞奎　(1992—), 男, 河南人, 西安电子科技大学博士研究生, 研究方向为雷达散射截面减缩、有源电路.



史琰　(1979—), 男, 天津人, 西安电子科技大学教授, 博士生导师, 研究方向为超材料、天线和计算电磁学.



孟浩轩　(1995—), 男, 陕西人, 西安电子科技大学硕士研究生, 研究方向为基于超表面的雷达散射截面减缩.