



基于有源超表面的导电板雷达截面增强捷变设计

王思豪, 廖 成, 尚玉平, 张润午

(西南交通大学 电磁场与微波技术研究所, 成都 610031)

摘 要: 提出了一种使用散射方向图的动态可重构以实现雷达散射截面增强的捷变设计方法。结合变容二极管加载, 使用具有嵌入式偏置回路的物理单元, 所提出的有源超表面可以在具有梯度电压的外加直流偏置下, 对平面电磁波的正入射或斜入射产生可电调的反射系数相位分布, 以达到对反射波角度的灵活重定向, 进而有助于单站或双站雷达散射截面增强的捷变效果。以导电平板为例, 对三种不同的入射反射场景进行了计算与全波仿真, 在设计频率 10 GHz 处, 所提出的设计产生了可重构的散射方向图, 表明了该设计对反射波角度的实时控制, 并结合实验测量验证了单站与双站雷达散射截面的有效增强结果。

关键词: 后向散射; 双站散射; 有源超表面; 方向图重构

中图分类号: O441.4

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.200331

Agile design of cross-section enhancement of a conducting plate radar through active metasurface

Wang Sihao, Liao Cheng, Shang Yuping, Zhang Runwu

(Institute of Electromagnetic Field and Microwave Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The design concept of employing the dynamically reconfigurable scattering pattern to enhance radar cross-section is proposed and examined. In combination with varactor loading, a physical unit cell geometry with an embedded bias network for the varactors is utilized to build the metasurface. Biased by an applied direct-current source with voltage gradient, the proposed active metasurface can exhibit electrically tunable reflection phase distributions for either normal or oblique incidence plane wave, so as to achieve flexible redirection of the angle of reflection. As a result, the agile effect for monostatic or bistatic cross-section enhancement is then facilitated. Taking a conducting plate as an example, three different incidence and reflection scenarios are considered for calculation and full-wave simulation. Reconfigurable scattering patterns produced at the operating frequency of 10 GHz by the presented design are observed, which indicates its capability of real-time control of the angle of reflection. In conjunction with an experimental measurement, the effective enhancement of monostatic and bistatic cross-sections are validated.

Key words: monostatic scattering; bistatic scattering; active metasurface; reconfigurable pattern

雷达散射截面增强正由于其实际应用而得到越来越多的研究关注^[1]。在军事应用中, 当友方飞行目标如遥控飞行器、再入飞行器、卫星或靶标等需要被追踪时, 雷达散射截面增强设计有助于在选定的频率和角域范围内提供稳定的回波信号, 或者增加目标能被探测到的最大距离; 另一方面, 具有限定物理尺寸的小目标可以通过雷达散射截面增强设计而产生可观的雷达散射特征, 进而作为雷达诱饵干扰敌方雷达, 以助于提高友方目标的战场生存能力。在民用领域中, 雷达散射截面增强设计可以增强各类小目标如救生艇、小木船、浮标等的雷达回波强度, 从而提高救援概率和航海安全性。导电平板是电磁散射研究领域中的一种经典目标, 同时类平板结构也是许多雷达目标的组成部件^[2]。一般地, 导电平板在平面电磁波正入射时可产生较强的单站雷达散射截面, 当平面电磁波斜入射时可在镜面反射方向上产生较强的双站雷达散射截面。然而, 正入射时的双站雷达散射截面, 以及斜入射时

* 收稿日期: 2020-12-10; 修订日期: 2021-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(61601379, 61771407); 中央高校基本科研业务费资助项目(2682018CX41)

作者简介: 王思豪(1994—), 男, 硕士研究生, 从事雷达散射截面调控研究; 18382412052@163.com。

通信作者: 廖 成(1964—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为计算电磁学、电磁散射与逆散射、天线理论与设计等; c.liao@swjtu.edu.cn。

的单站雷达散射截面,通常具有较小的幅值。鉴于在实际的电磁环境中,目标大多数时候是处于平面电磁波的斜入射状态,故研究导电平板在非正法线方向上的雷达散射截面增强具有实际性。

近年来,超表面由于其对电磁波特征的灵活调控而受到了众多关注,研究人员提出了诸如吸波材料^[3-6]、频率选择结构^[7-9]、极化旋转器^[10-12]、透镜天线^[13-15]、电磁散射调控^[16]等先进的微波器件及应用。在无源超表面的基础上,目前已报道的有源超表面主要通过加载电可调的集总元件^[17-26]、机械调节单元内部的结构尺寸^[27-29]、以及电调节介质材料的电磁特性^[30-31]来进行物理实现,其工作频段主要分布于微波^[17-31]、太赫兹^[32-33]或光学频段^[34-35]。在雷达散射截面控制方面,基于无源对消^[36-37]、吸波单元^[38-39]以及相位梯度^[40-42]的无源超表面已被报道用于雷达散射截面减缩。此外,通过反射系数相位的梯度设计,超表面作为一种极低剖面的覆盖层,实现了经典电磁散射目标的雷达散射截面增强^[1,43]。然而,这些应用于雷达散射截面增强的超表面设计大多属于无源结构,无源超表面在设计完成之后呈现为相对固定不变的雷达散射截面增强效果,平面电磁波入射方向的变化将对最优增强效果产生明显影响,这一特点可能使无源超表面设计的应用范围受到限制。考虑到动目标与入射波源之间相对位置关系的实时变化,实现具有动态可调特性的雷达散射截面增强设计将有助于目标在宽角域宽频域范围内按需保持增强效果。因此,设计可用于动态调控雷达散射截面增强效果的有源超表面是一项有意义的工作。

本文通过一种变容二极管加载的有源超表面,研究了导电平板雷达散射截面增强的捷变设计。所提出的有源超表面单元结构嵌入了变容二极管的偏置回路^[19],从而能在不明显增加单元结构复杂度的情况下达到偏置和可调的目标。将单元结构合适地组建为阵列,获得有源超表面设计,结合可编程电压源提供多通道相互独立的直流偏置电压,实时改变有源超表面不同单元中变容二极管两端的偏置状态,超表面可对不同入射角度的平面电磁波表现出特定的反射系数相位梯度。通过单站和双站情形示例,观察到的具有可重构特性的散射方向图表明了所提出的设计实现了对导电平板主散射传播方向的有效动态调控,进而在预定的不同角度上获得增强的雷达散射截面。

1 有源超表面的原理

位于 xOy 平面内的有源超表面的剖面示意图如图1所示,为了便于分析,将有源超表面的不同单元依次编号为1至 N , P_c 表示超表面沿着 x 轴方向的单元周期。波矢量 k 平行于 xOz 面的平面电磁波以入射角 φ_i 照射于超表面,在图1中用射线A表示;射线B表示入射射线A的镜面反射,而射线C表示预定的散射增强方向,其位于反射角 φ_r 方向。当 $\varphi_r = -\varphi_i$ 时,射线C与射线A重合,表示单站雷达散射截面增强情形;当 $\varphi_r \neq -\varphi_i$ 时,表示双站雷达散射截面增强情形。

根据广义反射定律^[44],对于给定入射角 φ_i 的平面电磁波照射,为了调节反射波的角度 φ_r ,超表面的第 n 个单元须满足的反射系数相位 Φ_n 为

$$\Phi_n = \Phi_{n-1} + k_0 P_c (\sin \varphi_i - \sin \varphi_r) \quad (1)$$

其中, k_0 表示入射平面电磁波的自由空间传播常数。考虑三种情形对有源超表面的捷变效果进行评估:(i)单站情形, $\varphi_i = 30^\circ$, $\varphi_r = -30^\circ$;(ii)双站情形, $\varphi_i = 0^\circ$, $\varphi_r = 30^\circ$;(iii)双站情形, $\varphi_i = 0^\circ$, $\varphi_r = 60^\circ$ 。取 $N = 8$ 以及频率 $f = 10$ GHz,将上述入射角与反射角分别代入公式(1),可计算得到三种情形下超表面中各单元的反射系数相位分布情况,如图2所示。

2 有源超表面的设计

根据图2可知,为了调控反射波角度 φ_r ,超表面的每一单元在不同情形下需呈现出不同的反射系数相位。为了实现反射系数相位的可调性,本文采用加载变容二极管调节结构等效电容的方式,如图3所示,一只变容二极管加载于矩形导电栅格与矩形导电贴片之间,金属化通孔穿过相对介电常数为10.2、介质损耗角正切为0.0023、厚度为0.635 mm的介质基片,将介质基片上表面的矩形导电贴

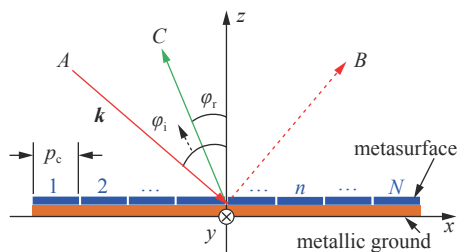


Fig. 1 Diagram of metasurface illuminated by a plane electromagnetic wave

图1 平面电磁波照射下有源超表面的剖面示意图

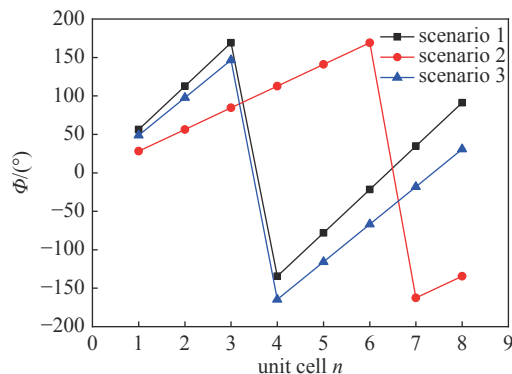


Fig. 2 Calculated reflection phase distributions for three scenarios

图2 超表面各单元的反射系数相位分布计算结果

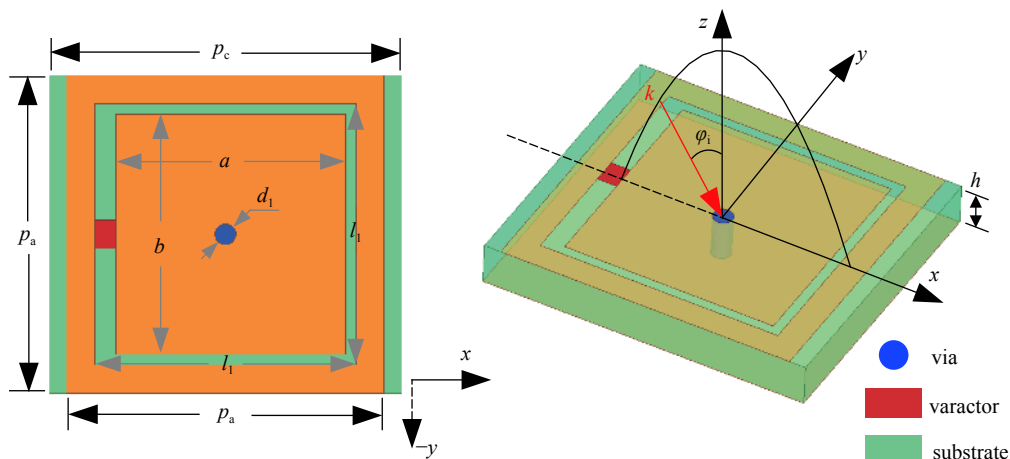


Fig. 3 Top and perspective views of the unit cell geometry

图3 单元结构的顶视图与三维视图

片与介质基片下表面的导电地板相连。直流偏置电压源的正极偏置线与矩形导电栅格相连，而负极偏置线与导电地板相接，由此形成与单元结构相结合的偏置回路。有源超表面单元的其他尺寸参数为： $p_a=4.5\text{ mm}$ ， $l_1=3.7\text{ mm}$ ， $a=3.25\text{ mm}$ ， $b=3.4\text{ mm}$ ， $d_1=0.3\text{ mm}$ 。在全波电磁仿真软件 CST 中使用周期边界条件，可获得该单元对应的平面周期阵列在具有入射角 φ_i 的平面电磁波激励下的表面反射系数相位，将 xOz 面视为入射平面，图 4 所示例子为 TM 极化正入射时反射系数相位在 10 GHz 随着变容二极管容值 C 的变化曲线。可以看出，变容二极管容值的改变使得超表面的反射系数相位可在几乎 $\pm 180^\circ$ 范围内按需变化。因此，可以使用具有不同变容二极管容值的单元组建阵列，实现反射系数的相位梯度。

根据三种情形给定的入射角 φ_i 以及变容二极管容值 C 与反射系数相位的对应关系，通过全波仿真可以确定出满足图 2 所示相位分布要求的变容二极管容值分布，如图 5 所示，故沿着图 1 中的 x 轴方向，各个单元的变容二极管容值为非均匀分布。由此便可将图 3 所示单元结构排布为二维平面阵列，应该指明的是，本文考虑反射波在 xOz 面内的重定向，因此单元 $n(n=1, 2, \dots, N)$ 的容值在 y 轴方向为均匀分布，所获得的有源超表面结构如图 6 所示，图中相对于入射方向的第 n 行与图 1 中的单元 n 为一一对应。为了在 x 轴方向上提供图 5 所示的容值非均匀分布，根据变容二极管容值 C 与反偏电压 V 的对应关系，从第 1 行至第 N 行依次提供了梯度偏置电压 $V_n(n=1, 2, \dots, N)$ 。由于单元 n 的容值在 y 轴方向上的均匀性，第 n 行内的所有单元共享同一偏置电压 V_n 。在图 6 所示阵列结构中，不同行之间的电压梯度以及同一行之内均匀电压，主要由介质基片上表面的矩形导电栅格实现，如图 6 中插图所示。尽管该阵列结构中涉及了多个互不相同的电压值，借由金属化通孔，有源超表面所有单元的变容二极管可以共用介质基片下表面的导电地板，实现与偏置电压源负极的连接，这使得有源超表面整体仅需一个射频扼流圈和一条负极偏置连接线，由此提升了直流偏置网络的紧凑性。

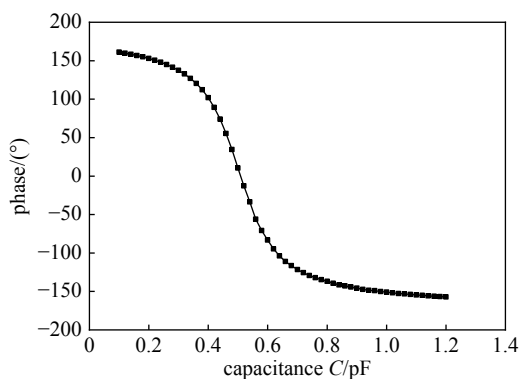


Fig. 4 Simulated reflection phase varying with the capacitance C for TM-polarization normal incidence at 10 GHz

图4 在 TM 极化正入射时反射系数相位在 10 GHz 随电容 C 的变化曲线

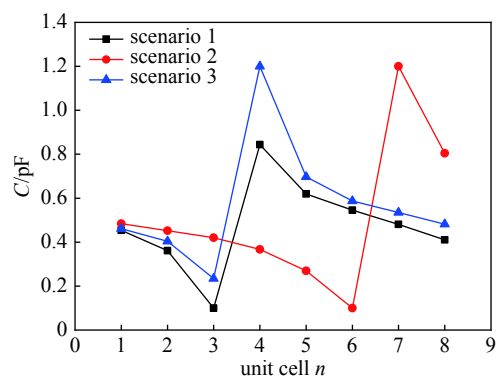


Fig. 5 Simulated varactor capacitance distributions for the three scenarios

图5 针对三种情形而得的变容二极管容值分布

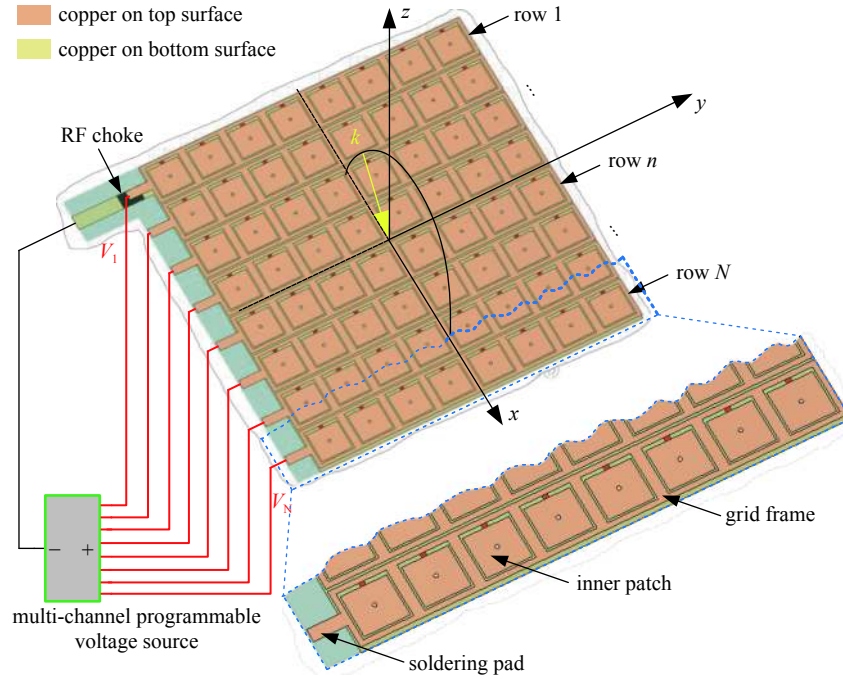


Fig. 6 Diagram of the active metasurface structure and its biasing network

图 6 有源超表面结构及其偏置网络示意

3 仿真结果

对于三种情形,有源超表面的雷达散射截面仿真结果示于图 7。为了比较雷达散射截面增强效果,图 7 也给出了与有源超表面物理面积(37.6 mm×36 mm)相等的导电平板在三种情形下的雷达散射截面仿真结果。在设计频率 10 GHz 处,根据图 7(a),情形(i)时由有源超表面所产生的单站雷达散射截面为-17.08 dB_{sm},而此时由导电平板所产生的单站雷达散射截面为-28.64 dB_{sm},因此获得了 11.56 dB 的单站雷达散射截面增强。根据图 7(b),情形(ii)时有源超表面与导电平板的双站雷达散射截面分别为-16.78 dB_{sm}与-21.85 dB_{sm},故增强幅度为 5.07 dB。对于图 7(c)所示的情形(iii),有源超表面与导电平板的双站雷达散射截面分别为-17.73 dB_{sm}与 28.55 dB_{sm},因此增强幅度为 10.82 dB。相比于情形(iii),情形(ii)时增强幅度未达到 10 dB 的原因是预定的反射方向已靠近镜面反射方向。虽然本文仅例举了三种入射反射场景,但不难得出结论,通过实时调节偏置电压梯度来控制阵列中的变容二极管容值,有源超表面可呈现出其它合适的反射系数相位梯度,以对半空间范围内的大多数入射反射场景产生雷达散射截面增强效果。值得注意的是,对于某一种具体的入射反射场景,虽然在导电平板表面铺设满足(1)所要求反射系数相位的 N 个无源超表面单元^[1,40]可产生类似的雷达散射截面增强效果,但由(1)可知,当场景涉及的入射角与反射角二者中任一个发生变化时,超表面单元 n 所需呈现的反射系数相位亦随之改变。然而,由于固定不变的物理结构与尺寸,无源超表面单元 n 几乎无法同步产生对应所需的反射系数相位,这意味着入射反射场景变化之后的雷达散射截面增强效果将受到影响^[1,40]。相比之下,本文所设计的有源超表面单元可动态调节以满足目标所需值,从而对多个入射反射场景维持较优的雷达散射截面增强效果,该灵活性是相对于无源超表面的一个重要特性,尽

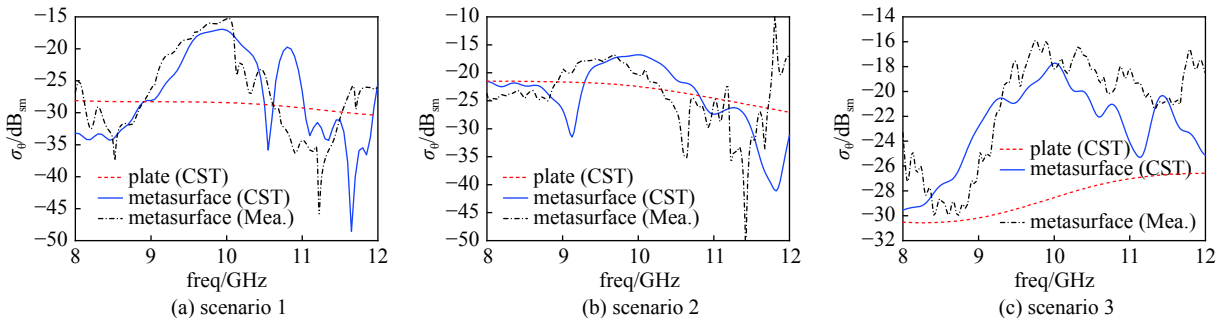


Fig. 7 Scattering cross-section by the active metasurface and conducting plate for the three scenarios

图 7 有源超表面和导电平板在三种情形时的雷达散射截面结果

管有源超表面涉及额外的直流偏置源。

为了进一步理解和考察有源超表面对反射波角度的重定向作用,图8给出了三种情形中有源超表面和导电平板在10 GHz和 xOz 面内的散射方向图。可以看出,相比于导电平板的散射方向图,有源超表面通过表面反射系数相位补偿对反射波前的调整,可在预定的观察角度附近产生一个明显的散射波瓣。因此,借助有源超表面设计中反射系数相位梯度的调节灵活性,对于其他的入射与反射情形,合适地调整变容二极管的容值以实现所需的反射系数相位梯度,所提出的设计可在 xOz 面内动态重构超表面的散射方向图,进而将主散射波瓣重定向于预定的观察角度上,由此达到雷达散射截面增强的捷变设计目标。

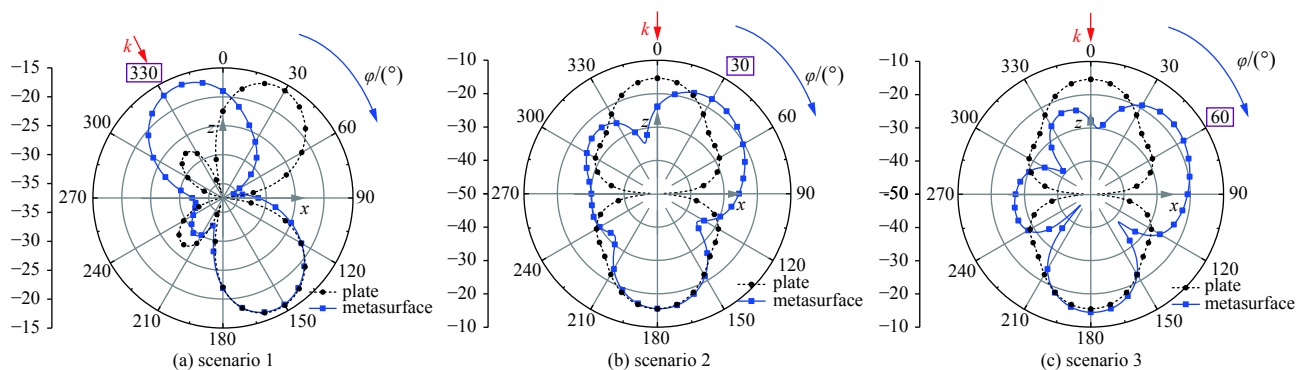


Fig. 8 Scattering pattern in xOz plane of the active metasurface and conducting plate at 10 GHz

图8 有源超表面和导电平板在10 GHz处 xOz 面的散射方向图

4 实验测量

为了验证上述基于全波仿真的观察结果,对图6所示的有源超表面进行了制作加工与实验测量。采用Taconic RF-10作为有源超表面的介质基片,图9提供了用于实验的样件照片。根据图3所示的单元结构尺寸和图4所示的容值变化范围,选用了倒装片式M/A-COM变容二极管MAVR0001201411进行加载,进而确定有源超表面所需的反偏电压范围为0~15 V。考虑到取值互不相同的电压梯度 V_n ,采用多通道电压输出放大器Analog Devices AD5535B作为直流偏置电压源,为有源超表面的每一行提供独立且编程可调的偏置电压。使用了一个47 kΩ的表面贴装电阻器作为射频扼流圈,连接于直流偏置电压源的负极和有源超表面的导电接地板之间。

在微波暗室进行样件的雷达散射截面测量,如图10所示为实验场景示意图,使用两个与矢量网络分析仪相连的宽带喇叭天线作为发射和接收天线。一台计算机连接于多通道电压输出放大器,实现对各通道电压的编程控制,各通道电压输出通过排线馈电于超表面。样件及校准金属板位于喇叭天线的远场区。使用测得的背景信号、校准金属板以及样件的信号,通过时域时间窗和频域校准步骤^[6],以标定样件的雷达散射截面。测得的雷达散射截面结果已示于图7。实测曲线与仿真曲线在频率上存在一定偏移,主要原因是变容二极管两端的焊接用锡量以及标称容值随着实际偏置电压的调节精度,导致实际的反射系数相位与目标值之间存在一定差异。总体而言,实测结果与仿真结果基本吻合,验证了设计的有效性。

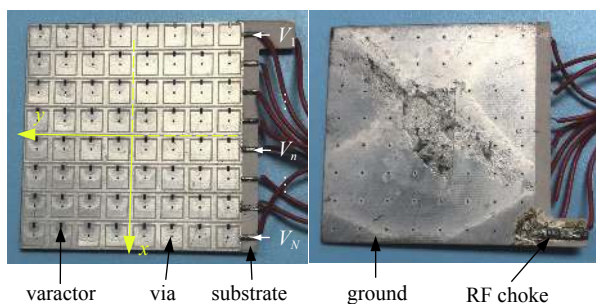


Fig. 9 Photo of the fabricated active metasurface

图9 有源超表面的样件照片

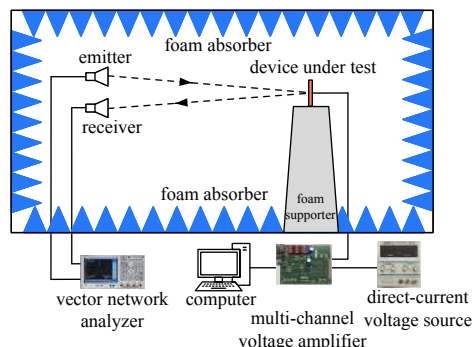


Fig. 10 Radar cross-section measurement setup within the microwave anechoic chamber

图10 雷达散射截面测量实验场景示意图

5 结 论

通过使用变容二极管加载对有源超表面进行设计, 实现了反射系数相位梯度的灵活可调性, 对于不同的入射反射情形, 达到了有源超表面散射方向图的按需可重构, 并借助重定向于预定观察角度上的主散射波瓣, 观察到了明显的雷达散射截面增强结果。依靠单元结构和可编程电压梯度, 所提出的设计可针对不同的入射反射情形产生具有捷变效果的雷达散射截面增强, 并在宽角域范围内通过重构散射方向图而呈现出有效的雷达散射截面增强。对于双站情形, 所获得的主散射波瓣具有宽角扫描特性。

参考文献:

- [1] Shang Yuping, Shen Zhongxiang. Polarization-independent backscattering enhancement of cylinders based on conformal gradient metasurfaces[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(5): 2386-2396.
- [2] Shang Yuping, Xiao Shaoqiu, Shen Zhongxiang. Edge-on backscattering enhancement based on quasi-superdirective reradiation[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 14: 539-542.
- [3] He Yun, Feng Weisen, Guo Sai, et al. Design of a dual-band electromagnetic absorber with frequency selective surfaces[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(5): 841-845.
- [4] Edries M, Mohamed H A, Hekal S S, et al. A new compact quad-band metamaterial absorber using interlaced I/Square resonators: design, fabrication, and characterization[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 143723-143733.
- [5] Chen Jianlin, Shang Yuping, Liao Cheng. Double-layer circuit analog absorbers based on resistor-loaded square-loop arrays[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(4): 591-595.
- [6] Shang Yuping, Shen Zhongxiang, Xiao Shaoqiu. On the design of single-layer circuit analog absorber using double-square-loop array[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(12): 6022-6029.
- [7] 强宇, 周东方, 刘起坤, 等. 一种新型宽带吸收频率选择表面[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 103222. (Qiang Yu, Zhou Dongfang, Liu Qikun, et al. Novel absorptive frequency selective surface with wideband absorbing properties[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 103222)
- [8] Bashiri M, Ghobadi C, Nourinia J, et al. WiMAX, WLAN, and X-band filtering mechanism: simple-structured triple-band frequency selective surface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 3245-3248.
- [9] Esparza N, Alcón P, Herrán L F, et al. Substrate integrated waveguides structures using frequency selective surfaces operating in stop-band (SBFSS-SIW)[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016, 26(2): 113-115.
- [10] Cao Yue, Che Wenquan, Yang Wanchen, et al. Novel wideband polarization rotating metasurface element and its application for wideband folded reflectarray[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(3): 2118-2127.
- [11] Zhu H L, Chung K L, Ding Can, et al. Polarization-rotated waveguide antennas for base-station applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 1545-1548.
- [12] Yang Wanchen, Tam K W, Choi W W, et al. Novel polarization rotation technique based on an artificial magnetic conductor and its application in a low-profile circular polarization antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(12): 6206-6216.
- [13] Liang Jiajun, Huang Guanlong, Zhao Jianing, et al. Wideband phase-gradient metasurface antenna with focused beams[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 20767-20772.
- [14] Liu Kaiting, Ge Yuehe, Lin Chengxiu. A compact wideband high-gain metasurface-lens-corrected conical horn antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(3): 457-461.
- [15] 马宇, 章海锋, 刘婷, 等. 一种波束扫描超材料天线的设计[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 103206. (Ma Yu, Zhang Haifeng, Liu Ting, et al. Design of beam scanning metamaterial antenna[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 103206)
- [16] Wu Guozhang, Yu Wenqi, Lin Tao, et al. Ultra-wideband RCS reduction based on non-planar coding diffusive metasurface[J]. *Materials*, 2020, 13(21): 4773.
- [17] Liu Shuo, Xu Hexiu, Zhang Haochi, et al. Tunable ultrathin mantle cloak via varactor-diode-loaded metasurface[J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13403-13417.
- [18] Zhao Jie, Cheng Qiang, Chen Jie, et al. A tunable metamaterial absorber using varactor diodes[J]. *New Journal of Physics*, 2013, 15: 043049.
- [19] Luo Zhangjie, Long Jiang, Chen Xing, et al. Electrically tunable metasurface absorber based on dissipating behavior of embedded varactors[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109: 071107.
- [20] Zhu Bo O, Chen Ke, Jia Nan, et al. Dynamic control of electromagnetic wave propagation with the equivalent principle inspired tunable metasurface[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4971.
- [21] Feng Yijun, Zhu Bo, Chen Ke, et al. Dynamically controlling electromagnetic wave with tunable metasurfaces[C]//Proceedings of the 2015 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). 2015.
- [22] Lv Yanhe, Ding Xiao, Wang Bingzhong, et al. Wideband polarisation-insensitive metasurface with tunable near-field scattering focusing characteristic[J]. *Electronics Letters*, 2019, 55(14): 776-777.
- [23] Liu Fu, Tsilipakos O, Ptilakis A, et al. Intelligent metasurfaces with continuously tunable local surface impedance for multiple reconfigurable functions[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11: 044024.
- [24] Wu Zhanni, Ra'di Y, Grbic A. Tunable metasurfaces: a polarization rotator design[J]. *Physical Review X*, 2019, 9: 011036.

- [25] Yoo M, Lim S. Active metasurface for controlling reflection and absorption properties[J]. *Applied Physics Express*, 2014, 7: 112204.
- [26] Bensafieddine D, Djerfaj F, Chouireb F, et al. Design of tunable microwave transmission lines using metamaterial cells[J]. *Applied Physics A*, 2017, 123(4): 248.
- [27] Wu P C, Cai Hong, Gu Yuandong, et al. Dynamic metasurface for broadband electromagnetic modulator in reflection[C]//Proceedings of the 2016 IEEE 29th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. 2016: 230-233.
- [28] Odit M, Kapitanova P, Andryieuski A, et al. Experimental demonstration of water based tunable metasurface[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109: 011901.
- [29] Yang Hujiang, Yu Tianlin, Wang Qingmin, et al. Wave manipulation with magnetically tunable metasurfaces[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 5441.
- [30] 赵悒哲, 黄成, 卿安永. 基于液晶的U波段电控移相超材料[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 063001. (Zhao Yizhe, Huang Cheng, Qing Anyong. Voltage tunable metamaterial for phase shifting at U-band based on liquid crystal[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 063001)
- [31] Yang Xiaoqing, Zhang Di, Wu Shiyue, et al. Reconfigurable all-dielectric metasurface based on tunable chemical systems in aqueous solution[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 3190.
- [32] Sun Lili, Zhang Hao, Dong Guohua, et al. Dynamically tunable terahertz anomalous refraction and reflection based on graphene metasurfaces[J]. *Optics Communications*, 2019, 446: 10-15.
- [33] Yao Wei, Tang Linlong, Wang Jun, et al. Spectrally and spatially tunable terahertz metasurface lens based on graphene surface plasmons[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10: 4800909.
- [34] Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M, et al. MEMS-tunable dielectric metasurface lens[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 812.
- [35] Du Zhiyuan, Hu Bin, Liu Weiguang, et al. Tunable beam deflector by mutual motion of cascaded bilayer metasurfaces[J]. *Journal of Optics*, 2019, 21: 115101.
- [36] Shang Yuping, Lei Xue, Liao Cheng, et al. Frequency-selective structures with suppressed reflection through passive phase cancellation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(2): 1192-1197.
- [37] Modi A Y, Balanis C A, Birtcher C R, et al. New class of RCS-reduction metasurfaces based on scattering cancellation using array theory[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(1): 298-308.
- [38] Yu Jun, Jiang Wen, Gong Shuxi. Wideband angular stable absorber based on spoof surface plasmon polariton for RCS reduction[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(7): 1058-1062.
- [39] Sharma A, Dwari S, Kanaujia B K, et al. In-band RCS reduction and isolation enhancement of a 24 GHz radar antenna using metamaterial absorber for sensing and automotive radar applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(21): 13086-13093.
- [40] 雷雪, 邹义童, 尚玉平, 等. 基于超表面的钝二面角结构后向散射增强设计[J]. *电子元件与材料*, 2019, 38(8): 99-105. (Lei Xue, Zou Yitong, Shang Yuping, et al. Backscattering enhancement of an obtuse dihedral corner structure through metasurface[J]. *Electronic Components and Materials*, 2019, 38(8): 99-105)
- [41] 丰茂昌, 李勇峰, 张介秋, 等. 一种宽角域散射增强超表面的研究[J]. *物理学报*, 2018, 67: 198101. (Feng Maochang, Li Yongfeng, Zhang Jieqiu, et al. Research of a wide-angle backscattering enhancement metasurface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67: 198101)
- [42] Shang Yuping, Shen Zhongxiang, Feng Keming. Enhancement of backscattering by a conducting cylinder coated with gradient metasurface[J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120: 045109.
- [43] Shang Yuping, Shen Zhongxiang. Electromagnetic retroreflection augmented by spherical and conical metasurfaces[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122: 205104.
- [44] Yu Nanfang, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.