

一种复合型极化转换表面及其在天线辐射散射调控中的应用

郭泽旭 曹祥玉 高军 李思佳 杨欢欢 郝彪

Composite polarization conversion metasurface and its application in integrated regulation radiation and scattering of antenna

Guo Ze-Xu Cao Xiang-Yu Gao Jun Li Si-Jia Yang Huan-Huan Hao Biao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 234102 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200797

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200797>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于单层线-圆极化转换聚焦超表面的宽带高增益圆极化天线设计

Broadband circularly polarized high-gain antenna design based on linear-to-circular polarization conversion focusing metasurface

物理学报. 2017, 66(6): 064102 <https://doi.org/10.7498/aps.66.064102>

天线方向系数的一类计算逼近方法

A class of approximate computation method for antenna directivity

物理学报. 2020, 69(2): 028401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191268>

基于石墨烯的太赫兹波散射可调谐超表面

Graphene based tunable metasurface for terahertz scattering manipulation

物理学报. 2017, 66(20): 204101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.204101>

一种宽角域散射增强超表面的研究

Research of a wide-angle backscattering enhancement metasurface

物理学报. 2018, 67(19): 198101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181053>

螺旋波等离子体原型实验装置中天线的优化设计与功率沉积

Optimal design of helicon wave antenna and numerical investigation into power deposition on helicon physics prototype experiment

物理学报. 2019, 68(20): 205201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182107>

基于反射超表面产生太赫兹涡旋波束

Terahertz vortex beam generation based on reflective metasurface

物理学报. 2019, 68(23): 238101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191055>

一种复合型极化转换表面及其在天线辐射散射调控中的应用*

郭泽旭 曹祥玉[†] 高军 李思佳 杨欢欢 郝彪

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

(2020年5月27日收到; 2020年8月13日收到修改稿)

透射型极化转换表面因其具有易于与天线共形的巨大应用优势, 受到国内外学者的广泛关注. 本文将极化栅结构与各向异性贴片结构相结合, 设计并验证了一种复合型透射极化转换单元, 将该极化转换单元组成透射超表面, 可以同时实现极化选择和透射型线-圆极化变换两种功能. 当电磁波极化方向垂直于极化栅延伸方向入射到复合型极化转换表面时, 该极化转换表面可以在 9.3—10.9 GHz 实现透射型线-右旋圆极化转换, 当电磁波极化方向平行于极化栅延伸方向入射时, 可以实现同极化全反射. 将该极化转换单元及其镜像单元棋盘排布后组成棋盘排布表面, 以电磁表面覆层的形式应用于带宽为 9.4—10.7 GHz 的线极化源微带天线, 利用圆极化的相反旋向对消特性, 组成一款新颖的线极化天线. 相比于源微带天线, 在 9.5—10.5 GHz 该天线的线极化纯度得到提高, 同时实现了天线的前向增益提高和带内雷达散射截面减缩, 最大减缩量达 39.2 dB. 实验验证和仿真结果吻合较好, 该设计在高增益、低散射天线设计和天线辐射性能综合调控中具有重要的参考价值.

关键词: 透射型极化转换, 超表面, 天线

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Ja, 73.20.Mf

DOI: 10.7498/aps.69.20200797

1 引言

极化是电磁波的重要电磁特性之一, 在现代通信、导航和雷达目标识别中具有重要应用^[1,2]. 极化分为线极化、圆极化和椭圆极化, 在卫星通信、导航中产生高纯度的圆极化波成为研究热点^[3,4], 在 MIMO (multiple-input multiple-output) 天线中, 高增益、高极化纯度的线极化天线具有广泛的应用需求.

电磁超表面^[5-8]是厚度远小于波长的二维超材料, 能够实现对电磁波幅值^[9,10]、相位^[11,12]和极化^[13-16]的调制. 凭借其奇异的电磁特性, 电磁超

表面在电磁波的综合调控和天线设计中具有广泛应用. 传统的极化变换器具有带宽较窄、体积大、加工困难等缺点, 基于超表面的极化转换器^[17-19]很好地克服了这些缺点. 因其具有剖面低、设计灵活、损耗小、易于加工等特点, 极大地吸引了学者的注意. 透射型极化转换表面^[20-22]相比于反射型极化转换表面, 虽然具有设计困难、带宽较窄等缺点, 但其易于与源天线共形, 在应用中具有天然优势. 利用透射型线-圆极化转换单元及其镜像单元灵活排布, 与源天线实现一体化设计, 在辐射源的照射下可以实现多种电磁功能的应用.

随着现代超视距战争的发展, 雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 减缩技术^[23,24]在军事

* 国家自然科学基金 (批准号: 61471389, 61671464, 61701523, 61801508) 和陕西省自然科学基金 (批准号: 2018JM6040, 2019JQ-103, 2020JM-350) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: 418604809@qq.com

斗争中具有重要意义. 天线作为飞行平台上的电磁开放窗口, 是制约整个飞行平台 RCS 减缩的瓶颈. 在保证天线的正常高效辐射同时, 又要减小天线的 RCS 是一项具有难度的工作. 利用透射型超表面作为天线的电磁表面覆层, 通过对极化转换单元的合理排布, 可以在提高天线增益的同时, 减小天线的 RCS, 实现天线的辐射散射综合调控.

本文设计了一种同时具有极化选择和透射型线-圆极化转换功能的复合型极化转换表面, 将该线-圆极化转换单元及其镜像单元棋盘排布, 作为电磁表面覆层应用于线极化源天线后, 得到了一款新颖的线极化天线. 相比于源天线, 该天线可以同时实现极化纯度提高、前向增益提高和 RCS 减缩. 加工了实验样品并在微波暗室中进行了实际测量, 实验验证和仿真结果吻合较好, 验证了该设计的可行性.

2 复合型极化转换表面单元设计与仿真验证

对于上下表面具有相同金属贴片设计的各向异性结构透射型线-圆极化转换超表面, 主极化波透射会产生一个左(右)旋圆极化波, 交叉极化波透射时会产生与主极化波透射旋转方向相反的右(左)旋圆极化波. 当入射波空间内存在较大的交叉极化分量时, 主极化和交叉极化透射过表面会产生两个旋转方向相反的圆极化波. 在前向辐射空间叠加后, 两个相反旋向相反的圆极化波将会产生相消, 使圆极化轴比变差, 影响线-圆极化透射效果. 所以在透射型极化转换表面的应用中, 要尽量减小源天线和极化转换表面形成的空气腔中存在的交叉极化分量. 空气腔中的交叉极化分量主要来自于线极化源天线辐射时所产生的交叉极化分量, 以及

主极化波入射到极化转换表面时部分反射带来的交叉极化反射分量. 极化转换表面部分反射所带来的交叉极化反射分量是由超表面结构本身决定的, 应用极化栅的设计思想可以很好解决该问题^[21]. 本文中提出的复合型极化转换表面单元结构如图 1 所示, 黄色部分为金属, 蓝色部分为介质. 该结构由上层两片镜像对称的各向异性金属贴片、介质层(介电常数为 2.55, 电损耗角正切为 0.001)和下层极化栅组成, 单元的结构参数为: $h = 2.5$ mm, $p = 6.0$ mm, $a = 3.4$ mm, $b = 1.9$ mm, $d = 0.1$ mm, $c_1 = 0.2$ mm, $c_2 = 0.4$ mm. 在 Ansoft HFSS 15.0 软件中设置无限周期边界条件对该单元进行仿真分析.

在三维直角坐标系中, 定义极化栅延伸方向平行于 y 坐标轴, 入射波方向由 $-z$ 指向 z 垂直于极化栅, 如图 1 所示. 入射波为 x 极化波时, T_{xx} , T_{yx} , R_{xx} , R_{yx} 分别表示 x 极化到 x 极化透射, x 极化到 y 极化透射, x 极化到 x 极化反射, x 极化到 y 极化反射. 设置扫频范围为 8—12 GHz, 图 2(a) 可见, 透射的 x 极化分量和 y 极化分量在 10 GHz 附近幅值曲线有交叉, 幅值相近. 图 2(b) 中命名为相位差的曲线代表透射的 y 极化分量和透射的 x 极化分量之间的相位差 $\Delta\varphi$, y 极化分量的相位领先于 x 极化分量, 在 10 GHz 附近相位差近似为 90° . 根据圆极化波形成的幅值和相位条件可知, 该复合型极化转换表面可以实现 x 极化-左旋圆极化透射. 圆极化轴比(axial ratio, AR)可以由(1)式^[21]计算, 得到的轴比曲线如图 2(a) 所示, 3 dB 轴比带宽为 9.3—10.9 GHz.

$$AR = \left| 20 \lg \left\{ \tan \left[0.5 \arcsin \left(\frac{2T_{yy}T_{xy}}{T_{yy}^2 + T_{xy}^2} \sin \Delta\varphi \right) \right] \right\} \right|. \quad (1)$$

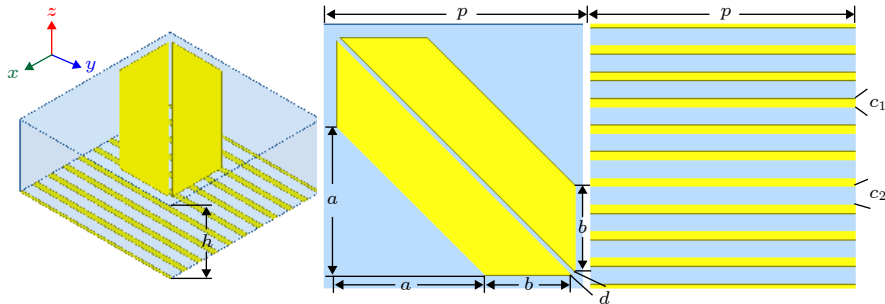


图 1 复合型极化转换表面单元结构示意图

Fig. 1. Schematic of the unit of composite polarization conversion metasurface.

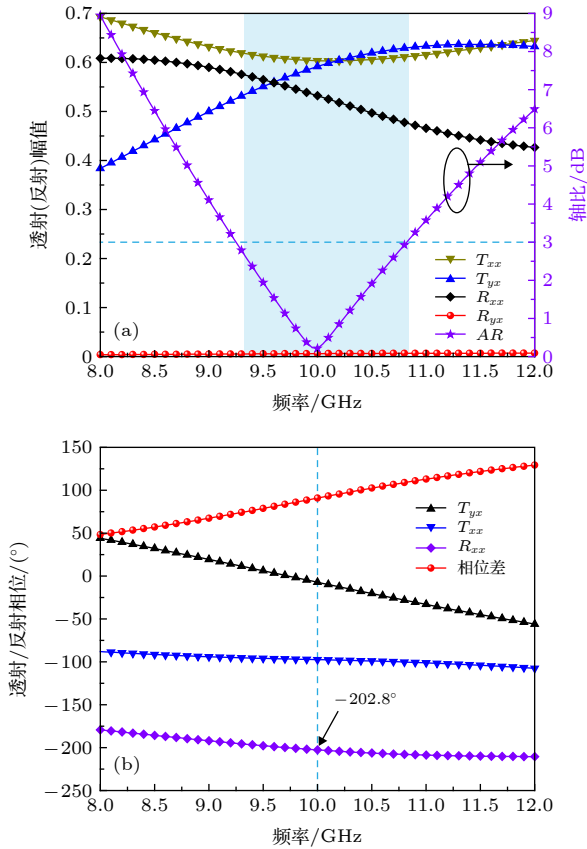


图2 复合型极化转换单元透射系数、反射系数、相位和轴比曲线 (a) 透射系数、反射系数和轴比; (b) 相位和相位差

Fig. 2. The transmission coefficient, reflection coefficient, phase and AR of the unit of composite polarization conversion metasurface: (a) Transmission coefficient, reflection coefficient and AR; (b) phase and phase difference.

由于带有极化栅的设计, 当线极化源天线辐射 x 极化波时, 极化转换表面的交叉极化反射分量幅值近似为 0, 如图 2(a) 中 R_{yx} 所示. 在当入射波为 y 极化波时, 由于极化栅的极化选择特性, 对于 y 极化波极化栅相当于一块完整的金属面, 复合型极化转换表面将实现 y 极化波的同极化全反射.

将极化转换单元组成超表面, 取如图 3 中红色虚线框的范围作为一个单元, 分析上层金属贴片的极化转换功能. 对于入射的 x 极化波, 可以将其分解到两个正交的方向, 如图 3 所示. 在红色虚线框单元内, 由于两个正交的电磁波所在方向上的结构不同, 将会有不同的阻抗, 两个正交电磁波遇到不同的阻抗有不同的透射幅值和相位响应. 当透射幅值相近、透射相位差为 $\pm 90^\circ$ 时, 透射波为圆极化波.

为了从透射能量的角度, 进一步分析工作原理. 在 10 GHz 频点处, 分析了单元分别在 x 极化波

和 y 极化波入射时的上下表面感应电流强度和电场强度分布. 图 4(a) 为 x 极化波入射时, 单元上下表面的感应电流强度和电场强度分布, 图 4(b) 为 y 极化波入射时, 单元上下表面的感应电流强度和电场强度分布. 为了方便对比分析, 在不同的极化波入射下, 对电流强度分布和电场强度分布分别取相同的幅值刻度.

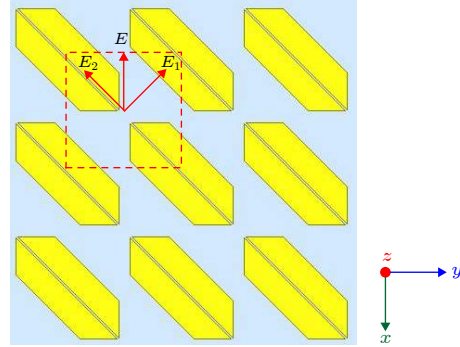


图3 极化转换原理图

Fig. 3. The schematic of polarization conversion.

当 x 极化波由 $-z$ 到 z 入射时, y 向极化栅可以很好地透射 x 极化波, 在上层各向异性金属贴片激发感应电流, 实现极化转换. 单元上下两层均有电场分布, 验证了单元在 x 极化电磁波照射下良好的透射特性. 当 y 极化波由 $-z$ 到 z 入射时, 极化栅阻挡了电磁波的通过. 由于极化栅对电磁波的反射, 仅在单元下表面激发了感应电流, 单元上表面各向异性金属贴片没有感应电流. 由于电磁波被 y 向极化栅完全屏蔽, 单元上下表面均没有电场分布.

为了验证复合型极化转换表面的透射型线-圆极化转换特性, 本文设计了一款工作于 10 GHz 的线极化微带天线作为辐射源天线, 如图 5(a) 所示. 天线的结构参数为: $l_0 = 72$ mm, $r_1 = 1.2$ mm, $r_2 = 3$ mm, $w = 12$ mm, $l_1 = 2.7$ mm, $l = 8.2$ mm, $h_1 = 2$ mm, $h_2 = 30$ mm, 工作带宽为 9.4—10.7 GHz. 将极化转换单元组成 12×12 的极化转换超表面, 作为电磁表面覆层置于辐射源天线上, 并将其命名为 12×12 排布表面-天线, 如图 5(b) 所示.

设置辐射边界条件, 源天线和 12×12 排布表面-天线仿真结果对比如图 6 所示. 12×12 排布表面-天线的反射系数与源天线相比向低频偏移, 但是阻抗匹配情况得到了很好的保持, -10 dB 带宽为 9.4—10.6 GHz; 通过图 6(b) 可知, 12×12 排布表面-天线 3 dB 圆极化带宽为 9.2—10.8 GHz, 实现了透射型线-圆极化转换.

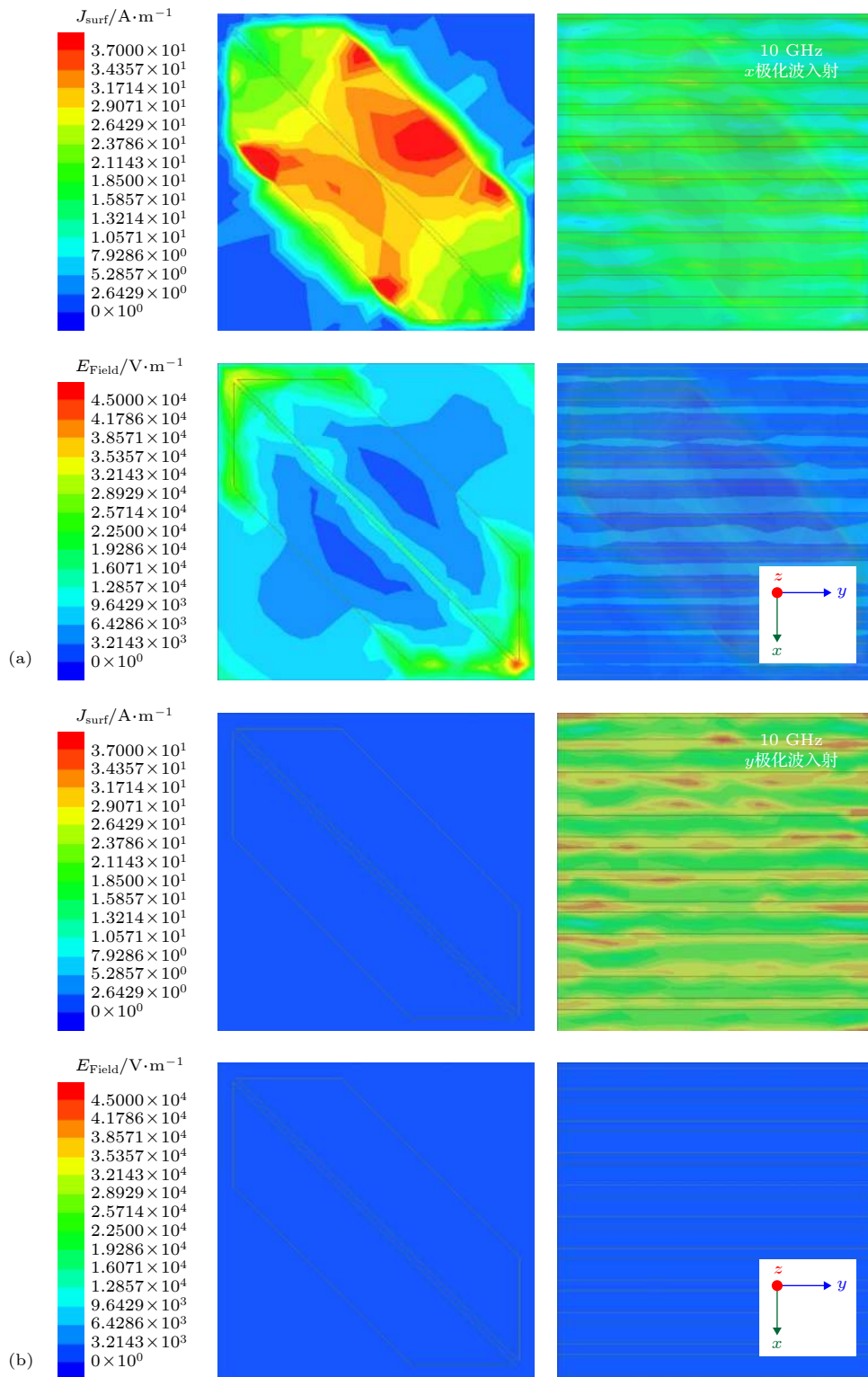


图 4 10 Hz 频点处, 复合型极化转换单元感应电流强度和电场强度分布图 (a) x 极化入射波; (b) y 极化入射波

Fig. 4. The induced current and electric field intensity distribution of composite polarization conversion metasurface: (a) x -polarized incident wave; (b) y -polarized incident wave.

3 基于棋盘排布表面的线极化低 RCS 高增益天线

本节以复合型极化转换表面的线-圆极化透射

特性为基础, 并以实现天线的辐射散射综合调控为目标, 设计了一款基于棋盘排布表面的线极化低 RCS 高增益天线. 根据镜像对称原理, 将上层金属贴片镜像对称后, 仍然以 x 极化波作为辐射源,

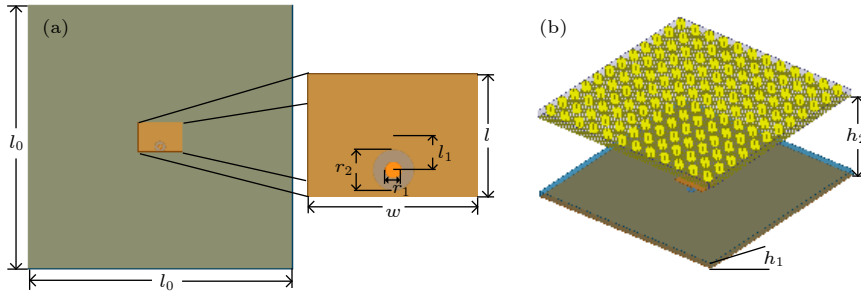


图 5 源微带天线和基于 12×12 单元排布表面的圆极化高增益天线 (a) 线极化微带天线; (b) 圆极化高增益天线

Fig. 5. The source microstrip antenna and circularly polarized high gain antenna based on 12×12 units arrangement metasurface (a) The linearly polarized microstrip antenna; (b) the circularly polarized high gain antenna.

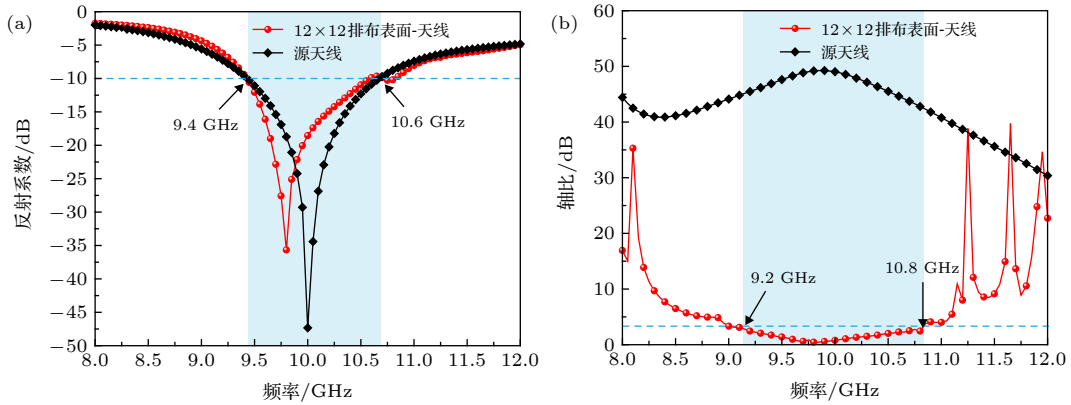


图 6 12×12 排布表面-天线与源天线对比图 (a) 反射系数随频率变化曲线; (b) 轴比随频率变化曲线;

Fig. 6. Comparison between the 12×12 units arrangement metasurface-antenna and source antenna: (a) Reflection coefficient varies with frequency; (b) AR varies with frequency.

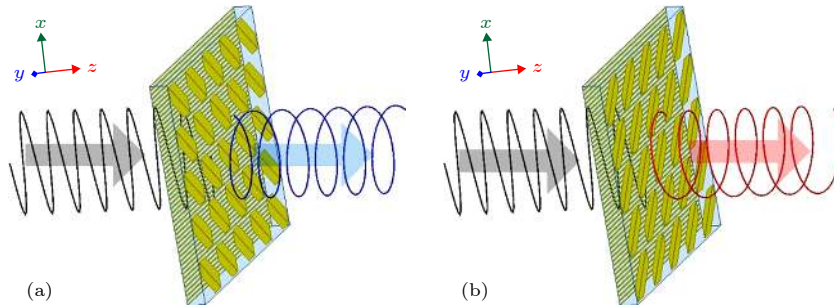


图 7 线-圆极化转换现象示意图 (a) 线-左旋圆极化转换; (b) 线-右旋圆极化转换

Fig. 7. Schematic of the linear to circular polarization conversion phenomenon: (a) Linear to left-hand circular polarization conversion; (b) linear to right-hand circular polarization conversion.

可以实现 x 极化波到右旋圆极化波透射, 如图 7 所示.

线极化波可以分解为两个旋转方向相反、幅值相同的圆极化波. 同时两个旋转方向相反的圆极化波也可形成线极化波. 理论上分析, 将极化转换表面及其镜像表面棋盘布阵后, 同一个空间内将会同时存在同频率、同幅度、同分量的左旋圆极化波和右旋圆极化波, 两种极化波相互叠加, 可以保持源

天线的线极化透射. 为了验证所提出的思路, 将极化转换单元及其镜像单元组成 6×6 的子阵, 分别命名为 part 1, part 2, 将 part 1 和 part 2 棋盘布阵后, 组成一个 12×12 的棋盘排布表面. 将设计的棋盘排布表面作为电磁表面覆层置于 10 GHz 源天线上方, 电磁表面覆层和微带天线的地板之间可以形成 Fabry-Perot 谐振腔, 要使得辐射同相叠加增强, 可根据 (2) 式^[21] 计算得到 h_3 高度:

$$\varphi_r + \varphi_d - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2H = -2N\pi, \quad (2)$$

其中, φ_r 表示极化转换表面的同极化反射相位, φ_d 表示天线地板的反射相位, H 为天线地板和极化转换表面形成谐振腔的高度, λ 为 10 GHz 对应的波长. 由图 2(b) 中可知, 在 10 GHz 处 $\varphi_r = -202.8^\circ$. 通常, 天线地板的反射相位取 $\varphi_d = -180^\circ$. 为了保证天线的阻抗匹配良好同时降低天线剖面, 取

$N = 3$, 计算可得 $H = 29.1$ mm. 经过谐振腔高度优化, 最终取 $h_3 = 30$ mm. 将加载了棋盘排布表面的天线命名: 棋盘排布表面-天线, 如图 8 所示.

设置辐射边界条件, 源天线和棋盘排布表面-天线仿真结果对比如图 9 所示. 棋盘排布表面-天线的反射系数与源天线相比向低频偏移, 阻抗的匹配情况保持较好, -10 dB 的带宽为 9.4—10.5 GHz; 通过轴比对比图可知, 棋盘排布表面-天线

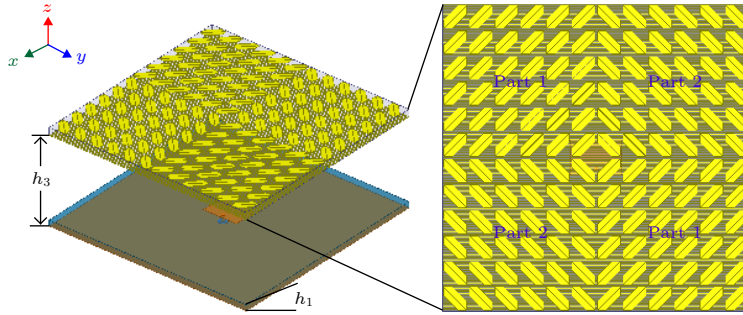


图 8 基于棋盘排布表面的线极化低 RCS 高增益天线

Fig. 8. Linearly polarized low RCS high gain antenna based on chessboard arrangement metasurface.

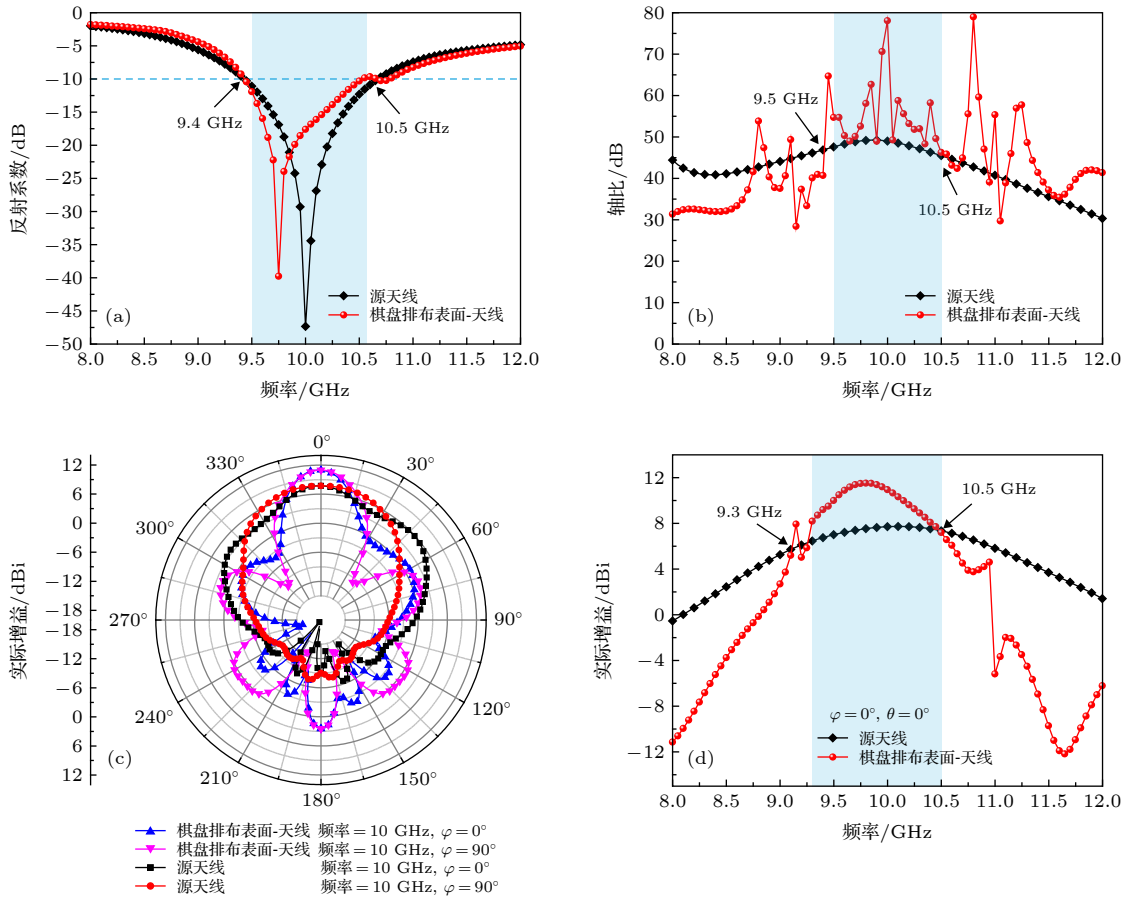


图 9 棋盘排布表面-天线与源天线对比图 (a) 反射系数随频率变化; (b) 轴比随频率变化; (c) 实际增益随 θ 变化; (d) 实际增益随频率变化

Fig. 9. Comparison between the chessboard arrangement metasurface-antenna and source antenna: (a) Reflection coefficient varies with frequency; (b) AR varies with frequency; (c) realized gain varies with θ ; (d) realized gain varies with frequency.

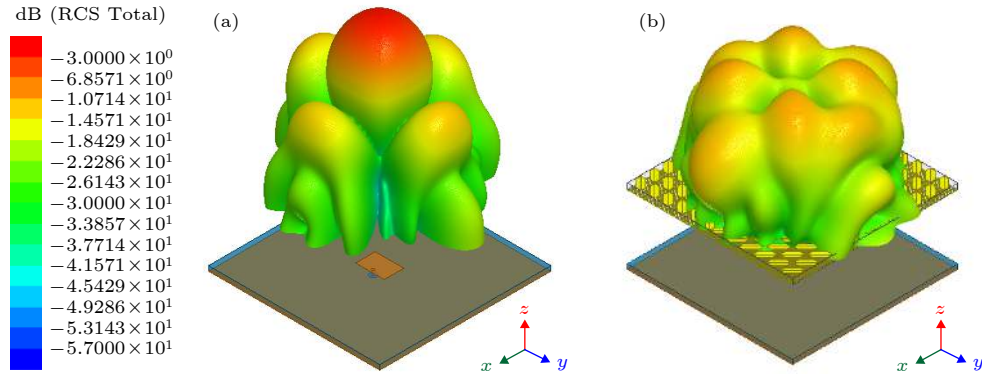


图 10 天线散射图 (a) 源天线; (b) 棋盘排布表面-天线

Fig. 10. Scattering pattern of antenna: (a) Source antenna; (b) chessboard arrangement metasurface-antenna.

在 9.5—10.5 GHz 频带内, 轴比均大于线极化源天线, 说明加上棋盘排布表面后天线的线极化纯度得到了提高. 在 10 GHz 频点, 对两款天线的增益曲线进行对比, 可以看出, 极化转换表面具有波束聚焦的效果, 前向增益提升. 从图 9(d) 中可以看出, 在 9.5—10.5 GHz 频带内, 前向增益均有提高, 增益提高的最大值为 1.8 dBi. 综合以上辐射分析, 所提出的棋盘排布表面-天线可以在 9.5—10.5 GHz 同时实现极化纯度提升和前向增益提高.

以 x 极化入射波作为雷达探测波, 对棋盘排布表面-天线散射分析. 本文所提出的棋盘排布表面-天线的工作带宽为 9.5—10.5 GHz, 为了有针对性地进行带内的 RCS 分析, 所以在扫频范围为 8—12 GHz 内. 10 GHz 频点处两种天线的三维 RCS 散射图如图 10 所示, 棋盘排布表面-天线具有漫散射效果, 相比于源天线 RCS 峰值明显减小.

扫频仿真对比结果如图 11(a) 所示, 定量分析了两款天线法向单站 RCS 情况. 棋盘排布表面-天线在 9.4—11.7 GHz 实现了法向单站 RCS 减缩, 最大 RCS 减缩幅值达 39.2 dB.

为了分析 RCS 减缩原因, 对组成棋盘排布表面的极化转换单元及其镜像单元进行了仿真分析. 组成棋盘排布表面-天线的源微带天线会对散射分析有影响, 所以以极化转换单元及其镜像单元为研究对象进行 RCS 分析时, 在距离极化转换单元 30 mm 处放了一块金属地, 来模拟源微带天线金属地板对超表面的影响. 设置无限周期边界条件, 以 x 极化波作为探测雷达波, 入射方向与天线辐射方向相反, 分别用 R_{xx} 和 R_{yx} 来代表 x 极化反射分量和 y 极化反射分量. 由于存在金属板, 电磁波透射量为 0, 即 $R_{xx}^2 + R_{yx}^2 = 1$. 镜像单元和原始单元

反射波中交叉极化分量和同极化分量如图 11(b) 所示, 呈现出相同的幅值特性. 在 10 GHz 附近, 带有金属的极化转换单元和镜像单元均具有反射型线-线极化转换效果, 即 x 极化入射后以 y 极化反射, 定义极化转换率 (polarization conversion ratio, PCR):

$$\text{PCR} = \frac{R_{yx}^2}{R_{xx}^2 + R_{yx}^2}. \quad (3)$$

图 11(c) 为原始单元及其镜像单元极化转换率曲线图, 10 GHz 附近, 极化转换率接近 1, 镜像单元和原始单元呈现出相同的幅值特性. 图 11(d) 为镜像单元和原始单元反射相位曲线图, 从图中可以看出两种单元 y 极化反射分量相位相差为 180° . 当两种单元同时受到 x 极化探测雷达波照射, 可以实现 y 极化反射波的相位相消, 以减小雷达反射回波. 所以, 当 y 极化反射分量幅值越大, 即图 11(c) 中 x - y 极化转换率越高时, 棋盘排布表面-天线的 RCS 减缩效果越好, 很好地解释了 RCS 减缩原理. 文中设置无限周期边界条件分析方式, 与辐射条件下对天线总体的单站 RCS 扫描分析方式相互契合的是最大 RCS 减缩频点在 10 GHz 附近, 以及 RCS 曲线的变化趋势, 并无定量分析.

综合以上辐射和散射分析, 所提出的棋盘排布表面-天线同时实现了线极化纯度提高、前向增益提高和 RCS 减缩多种功能, 实现了对天线的辐射散射一体化综合调控.

4 棋盘排布表面-天线的加工及实际测试

采用印刷电路板技术加工了棋盘排布表面和

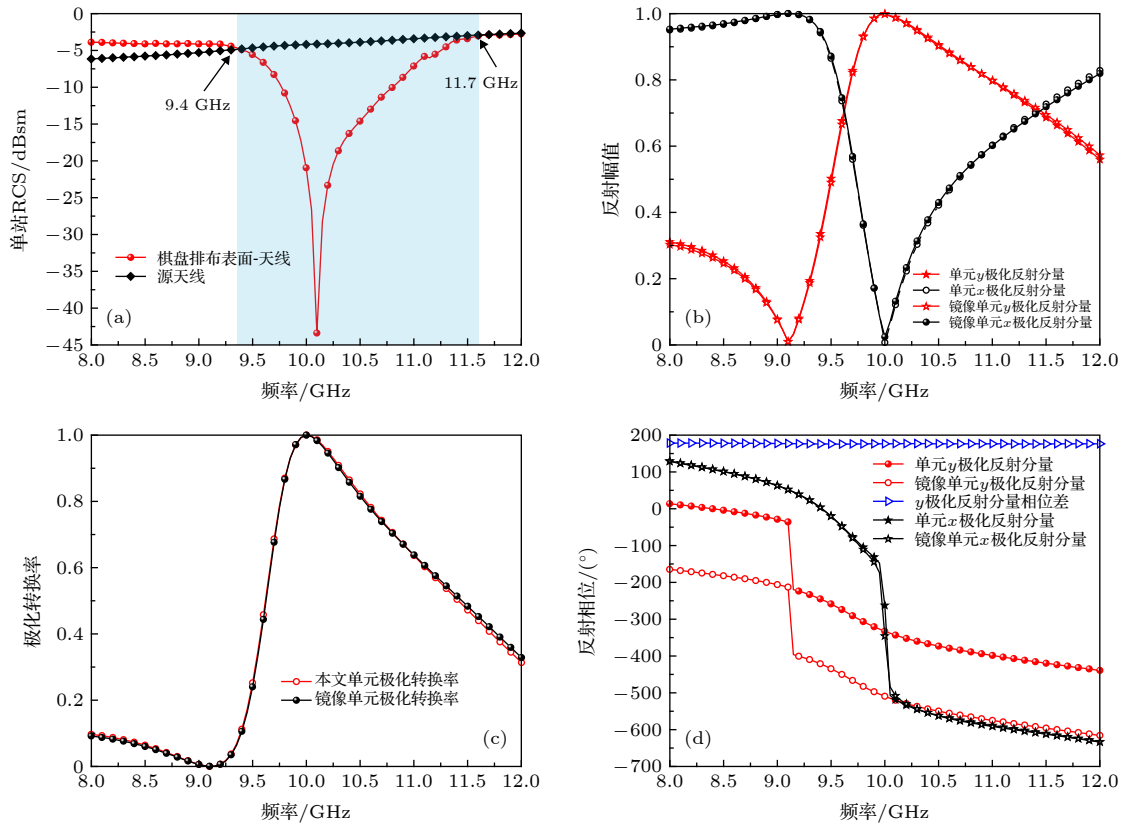


图 11 天线低 RCS 特性分析曲线 (a) 源天线和棋盘排布表面-天线单站 RCS; (b) 单元及其镜像单元反射幅值曲线; (c) 单元及其镜像单元极化转换率曲线; (d) 单元及其镜像单元反射相位曲线

Fig. 11. Analysis curve of low RCS characteristics of antenna: (a) Source antenna and chessboard arrangement metasurface-antenna single station RCS; (b) reflection amplitude curve of unit and its mirror unit; (c) polarization conversion curve of unit and its mirror unit; (d) reflection phase curve of unit and its mirror unit.

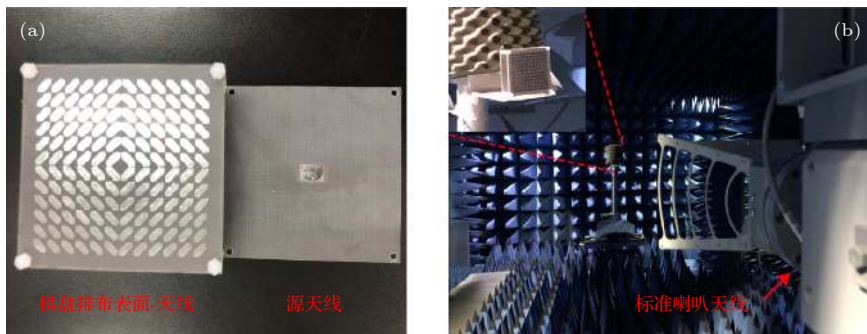


图 12 (a) 加工样品示意图; (b) 实测环境示意图

Fig. 12. (a) Schematic of fabricated sample; (b) measured environment.

源天线. 为了方便源天线和棋盘排布表面的组合固定, 加工时拓宽了天线和棋盘排布表面的中间介质层, 并打有 4 个通孔, 通过尼龙螺丝和尼龙垫片来固定并严格控制空气腔的高度, 组成棋盘排布表面-天线, 如图 12(a) 所示.

实际测试中使用的矢量网络分析仪型号为 Agilent N5230C, 测量频率范围 300 kHz—20 GHz, 具有两个内置信号源 110 dB 系统和 122 dB 接收机

动态范围. 测试线缆采用 Agilent 85131F 软线缆, 测试稳定性低于 0.12 dB, 插入损耗为 $0.25 \cdot \sqrt{f} + 0.2$ dB, 其中 f 单位为 GHz. 采用标准喇叭天线作为发射天线, 将测试天线安置在转台上, 并在天线后方放置吸波材料, 以减小转台对实验的影响. 使用水平校准仪, 将测试天线与标准喇叭天线的相位中心对齐. 测试天线与标准喇叭天线之间的距离满足远场条件. 由于实验条件的限制, 分别测试了源

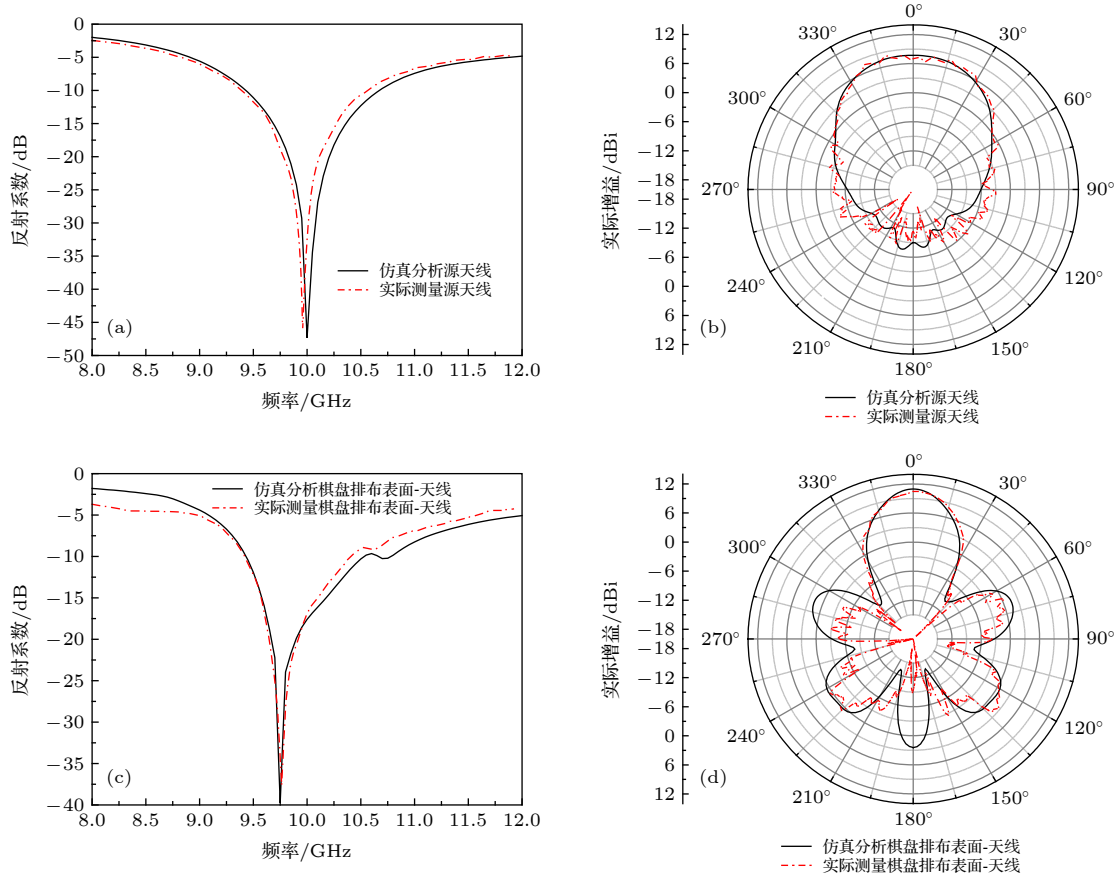


图 13 仿真结果与实验结果对比 (a) 源天线反射系数随频率变化; (b) 源天线实际增益随 θ 变化; (c) 棋盘排布表面-天线反射系数随频率变化; (d) 棋盘排布表面-天线实际增益随 θ 变化

Fig. 13. Comparison between simulation results and measurement results: (a) Reflection coefficient varies with frequency of source antenna; (b) realized gain varies with θ of source antenna; (c) reflection coefficient varies with frequency of chessboard arrangement metasurface-antenna; (d) realized gain varies with θ of chessboard arrangement metasurface-antenna.

天线和棋盘排布表面-天线的反射系数和辐射方向图, 仿真结果和测试结果对比如图 13 所示. 天线本身的边缘绕射等主要会对天线的方向图产生一定影响, 天线阻抗匹配问题, 主要反映的是天线能否在一定频带内有效工作, 驻波测试结果主要由天线设计效果、矢量网络分析仪的动态范围以及线缆与天线 SMA 接口之间的链接效果共同决定. 可以看见, 源天线和棋盘排布表面-天线的反射系数和方向图基本吻合, 实验验证了仿真设计的可行性. 由于实验不是在绝对理想的环境中进行、加工误差等原因, 仿真曲线与实际曲线的不符在误差允许的范围.

5 结论

本文在设计并验证了一种复合型极化转换表面的基础上, 利用圆极化相反旋向对消特性, 将复合型极化转换单元及其镜像单元棋盘排布, 以一款

线极化源微带天线作为辐射源, 得到了一款新颖的基于棋盘排布表面的线极化低 RCS 高增益天线, 实现了辐射散射的综合调控. 为了验证设计的可行性, 采用印刷电路板技术制作了基于棋盘排布表面的线极化低 RCS 高增益天线, 并在微波暗室中进行了实际测量. 实验验证和仿真结构吻合较好, 该设计在高增益、低 RCS 天线设计和天线辐射性能综合调控中具有重要的参考价值.

参考文献

- [1] Challita F, Laly P, Yusuf M, Tanghe E, Joseph W, Lienard M, Gaillot D P, Degauque P 2020 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **19** 297
- [2] Gaillot D P, Tanghe E, Joseph W, Laly P, Tran V C, Lienard M, Martens L 2015 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **63** 3219
- [3] Dimitrov K C, Lee Y, Min B W, Park J, Jeong J, Kim H J 2020 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **19** 317
- [4] Hasani H, Silva J S, Capdevila S, Garcia-Vigueras M, Mosig, J R 2019 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **67** 5325
- [5] Han J F, Cao X Y, Gao J, Li S J, Zhang C 2016 *Acta Phys.*

- Sin.* **65** 044201 (in Chinese) [韩江枫, 曹祥玉, 高军, 李思佳, 张晨 2016 物理学报 **65** 044201]
- [6] Lin D M, Fan P Y, Hasman E, Brongersma M L 2014 *Science* **345** 28
- [7] Tao Z, Wan X, Pan B C, Cui T J 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 121901
- [8] Binion J D, Lier E, Werner D H, Hand T H, Jiang Z H, Werner P L 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **68** 1302
- [9] Lei M, Feng N Y, Wang Q M, Hao Y N, Huang S G, Bi K 2016 *J. Appl. Phys.* **119** 244504
- [10] Luo H, Cheng Y Z 2019 *Opt. Mater.* **96** 109279
- [11] Wu L W, Ma H F, Gou Y, Wu R Y, Wang Z X, Wang M, Gao X X, Cui T J 2019 *Phys. Rev. Appl.* **12** 024012
- [12] Zheng Q Q, Li Y F, Pang Y Q, Chen H Y, Sui S, Yang J F, Ma H, Qu S B, Zhang J Q 2017 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65** 4470
- [13] Yang B W, Liu T, Guo H J, Xiao S Y, Zhou L 2019 *Sci. Bull.* **64** 823
- [14] Li S J, Li Y B, Li H, Wang Z X, Zhang C, Guo Z X, Li R Q, Cao X Y, Cheng Qiang, Cui T J 2020 *Ann. Phys.(Berlin)* **6** 2000020
- [15] Guo Y H, Huang Y J, Li X, Pu M B, Gao P, Jin J J, Ma X L, Luo X G 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1900503
- [16] Li S J, Cui T J, Li Y B, Zhang C, Li R Q, Cao X Y, Guo Z X 2019 *Adv. Theory Simul.* **2** 1900105
- [17] Yu Y Z, Xiao F J, He C, Jin R H, Zhu W R 2020 *Opt. Express* **28** 11797
- [18] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, Zeng Y, Reiten M T, Azad A K, Taylor A J, Dalvit D A R, Chen H T 2013 *Science* **340** 1304
- [19] Yu H C, Cao X Y, Gao J, Yang H H, Jidi L R, Han J F, Tong L I 2018 *Opt. Mater. Express* **8** 3373
- [20] Lin B Q, Guo J X, Ma Y H, Wu W S, Duan X Y, Wang Z, Li Y 2018 *Appl. Phys. A* **124** 715
- [21] Guo Z X, Cao X Y, Gao J, Yang H H, Jidi L R 2020 *J. Appl. Phys.* **127** 115103
- [22] Ni C, Chen M S, Zhang Z X, Wu X L 2018 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **17** 78
- [23] Lan J X, Cao X Y, Gao J, Han J F, Liu T, Cong L L, Wang S M 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 034101 (in Chinese) [兰俊祥, 曹祥玉, 高军, 韩江枫, 刘涛, 丛丽丽, 王思铭 2019 物理学报 **68** 034101]
- [24] Modi A Y, Alyahya M A, Balanis C A, Birtcher C R 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **68** 1436

Composite polarization conversion metasurface and its application in integrated regulation radiation and scattering of antenna*

Guo Ze-Xu Cao Xiang-Yu[†] Gao Jun Li Si-Jia
Yang Huan-Huan Hao Biao

(*Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China*)

(Received 27 May 2020; revised manuscript received 13 August 2020)

Abstract

The transmission polarization conversion metasurface has been widely concerned, because it has the advantage of being easy to be conformal with the antenna. Based on the reasonable arrangement of transmission polarization conversion units, various and complex electromagnetic functions can be realized. As the electromagnetic open window on the flight platform, the antenna is the bottleneck that restricts the decrease of radar cross section (RCS) of the whole flight platform. It is difficult to simultaneously realize the normal and efficient radiation of the antenna and the decrease of the RCS of the antenna. When the designed transmission metasurface is used in the antenna design, the radiation and scattering of the antenna can be regulated comprehensively. In this paper, a composite polarization conversion metasurface is proposed and verified. The unit cell of composite polarization conversion metasurface consists of two mirror symmetrical anisotropic metal patches in the upper layer, a dielectric layer and a polarization gate in the lower layer. When the polarization direction of the incident electromagnetic wave is perpendicular to the extension direction of the polarization gate and arrives at the composite polarization conversion surface, the conversion surface can realize the conversion from transmission linear polarization to right-hand circular polarization in a frequency range from 9.3 GHz to 10.9 GHz. When the polarization direction of the incident electromagnetic wave is parallel to the extension direction of the polarization gate, co-polarized total reflection can be realized. The chessboard arrangement metasurface is composed of composite polarization conversion unit and its mirror unit. A novel linearly polarized chessboard arrangement metasurface antenna is composed of the linearly polarized source microstrip antenna with a bandwidth of 9.4–10.7 GHz and the chessboard arrangement metasurface. By using the counter rotating cancellation characteristic of circular polarization, the chessboard arrangement metasurface antenna maintains linearly polarized radiation. Comparing with the source microstrip antenna, the linear polarization purity of chessboard arrangement metasurface antenna is improved from 9.5 GHz to 10.5 GHz. At the same time, the forward gain of the chessboard arrangement antenna increases and the radar cross section decreases. The maximum reduction is 39.2 dB. To further verify the practicability of the design and analysis, the chessboard arrangement metasurface antenna sample is fabricated and measured in microwave anechoic chamber with an Agilent 5230C network analyzer. The experimental results are in good agreement with the simulation results. This study has important reference value in the design of high gain, low RCS antenna and integrated regulation radiation and scattering of antenna.

Keywords: transmission polarization convention, metasurface, antenna

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Ja, 73.20.Mf

DOI: 10.7498/aps.69.20200797

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61471389, 61671464, 61701523, 61801508) and the Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (Grant Nos. 2018JM6040, 2019JQ-103, 2020JM-350).

[†] Corresponding author. E-mail: 418604809@qq.com