CN 51-1346/O4 ISSN 1003-501X (印刷版) ISSN 2094-4019 (网络版)

光电工程
Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

基于超表面的极化转换和雷达散射截面缩减设计

马依泽，李春树，马鑫，冯迪

引用本文:

马依泽，李春树，马鑫，等. 基于超表面的极化转换和雷达散射截面缩减设计[J]. 光电工程，2025， **52**(10): 250183.

Ma Y Z, Li C S, Ma X, et al. Design of polarization conversion and radar cross-section reduction based on metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, **52**(10): 250183.

https://doi.org/10.12086/oee.2025.250183

收稿日期: 2025-06-23; 修改日期: 2025-09-03; 录用日期: 2025-09-03

相关论文

电磁隐身衣的研究进展与发展趋势
孙冉，孙非，刘一超
光电工程 2024, **51**(10): 240191 doi: 10.12086/oee.2024.240191

弱手性超表面中的超常极化旋转
崔建华，马晓亮，蒲明博，郭迎辉，罗先刚
光电工程 2020, **47**(7): 190052 doi: 10.12086/oee.2020.190052

基于外禀手性的太赫兹超构表面角度色散高效调控
赵哲，林展逸，丁佳跃，杨嘉琪，罗莉，唐婷婷，李杰，姚建铨
光电工程 2025, **52**(8): 250093 doi: 10.12086/oee.2025.250093

更多相关论文见光电期刊集群网站

OEE 光电工程 Opto-Electronic Engineering
http://cn.oejournal.org/oee

OE_Journal
Website

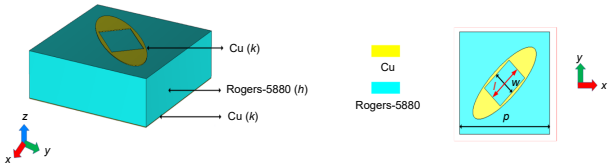
Opto-Electronic Engineering
光 电 工 程

Article

2025 年, 第 52 卷, 第 10 期

DOI: 10.12086/oee.2025.250183 CSTR: 32245.14.oee.2025.250183

基于超表面的极化转换和雷达散射截面缩减设计



马依泽*，李春树，马 鑫，冯 迪

宁夏大学电子与电气工程学院，宁夏 银川 750021

摘要： 本文设计了一款三层实现交叉极化转换的超表面结构。该结构工作于微波频段，在 9.53~22.38 GHz 频率范围内具有高于 95% 的极化转换率，带宽可达 12.85 GHz，且在 0°~30°入射角内极化转换率均大于 80%，展现出优越的入射角度不敏感特性。进一步面向雷达隐身需求，提出由相位差为 180°的超表面单元及其旋转单元构成的 6×6 棋盘型阵列。该阵列在 8.15~24.00 GHz 频段内雷达散射截面缩减小于 10 dB，相对带宽扩展至 98%。仿真结果表明，该设计兼具宽频带、高效率与低成本性，分别从极化转换优化与电磁散射调控角度为通信增强和隐身技术提供了解决方案。

关键词： 极化转换器；宽带极化转换；超表面；微波毫米波；雷达散射截面缩减

中图分类号： TN248.4 **文献标志码：** A

马依泽，李春树，马鑫，等. 基于超表面的极化转换和雷达散射截面缩减设计 [J]. 光电工程，2025，**52**(10): 250183
Ma Y Z, Li C S, Ma X, et al. Design of polarization conversion and radar cross-section reduction based on metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, **52**(10): 250183

Design of polarization conversion and radar cross-section reduction based on metasurfaces

Ma Yize*, Li Chunshu, Ma Xin, Feng Di

School of Electronics and Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China

Abstract: In this paper, a three-layer metasurface structure for cross-polarization conversion is designed. The structure operates in the microwave frequency band, achieving a polarization conversion rate exceeding 95% within the frequency range of 9.53 GHz to 22.38 GHz, with a bandwidth of up to 12.85 GHz. It also maintains a polarization conversion rate of more than 80% within the incidence angle of 0° to 30°, showing high incident angle insensitivity. To further meet the requirements of radar stealth, a 6×6 checkerboard array composed of the proposed metasurface unit and its rotating unit with a phase difference of 180° is proposed. The radar scattering cross-section of the array is reduced by less than 10 dB in the 8.15 GHz to 24.00 GHz frequency band, and the relative bandwidth is extended to 98%. Simulation results indicate that the proposed design method has both wide frequency band, high efficiency, and low cost, providing a solution for communication enhancement and stealth technology from the perspectives of polarization conversion optimization and electromagnetic scattering regulation, respectively.

Keywords: cross-polarization converter; broadband polarization conversion; metasurface; microwave and millimeter wave; radar cross-section reduction

收稿日期：2025-06-23；修回日期：2025-09-03；录用日期：2025-09-03；网络出版日期：2025-10-25
基金项目：国家自然科学基金 (42361075)
*通信作者：马依泽，18795134427@163.com
版权所有©2025 中国科学院光电技术研究所

1 引 言

极化在卫星通信、雷达探测、雷达隐身以及立体显示成像等方面具有重要的应用价值[1]，因此，目前的研究聚焦于电磁波极化状态的调控。基于双折射晶体法拉第效应的传统极化转换器普遍面临体积大、频带窄、集成度低的问题[2-3]。超材料的出现以一种新型的方式极大地促进了极化转换器的进步，为电磁调控领域提供了更为高效、多元的设计方案。尤其是由人工设计的亚波长结构单元构成的二维形式超材料的超表面 (metasurface)，能够精准操控电磁波的极化态，所构成的阵列能够高效地实现雷达散射截面缩减 (radar cross-section reduction, RCSR)[4-9]，从而迅速成为电磁调控领域的焦点[10-11]。

极化转换器可根据功能分为交叉极化转换器和线圆极化转换器，也可根据电磁波的传输方式分为透射型极化转换器和反射型极化转换器。其中交叉极化转换器可应用于雷达隐身、极化分集通信及抗干扰编码极化转换器等领域，而线圆极化转换广泛应用于卫星通信、雷达导引头及医学成像等方面。透射型器件以低损耗转换透射波极化，用于天线罩与极化透镜；而反射型器件能高效调控反射波极化，被集成于隐身蒙皮、低雷达散射截面 (radar cross-section, RCS) 舰船结构及卫星天线等领域。目前已报道的交叉极化转换研究如下：2018 年，Xu 等[12] 设计了一种“H”型、转换带宽为 12.5 GHz 的线极化转换器。王世彬等[13] 提出了一款极化转换率大于 90% 且转换带宽为 12.82 GHz 的极化转换器。2024 年 Aziz 等[14] 设计了一种在 8.5~25.5 GHz 频率范围内极化转换率大于 90% 的罗盘针形极化转换器。同年，张胜等[15] 基于椭圆结构设计了一种在 9.38~23.78 GHz 极化转换率大于 95% 的交叉极化转换器。然而，上述研究功能单一且不能完全适应极化转换器宽频带、高极化转换率且低成本等发展需求。

RCSR 和隐身衣技术作为隐身的双路径，二者依赖超材料实现能量重分布而实现，但其实现原理各不相同。RCSR 是通过管理散射能量降低探测性，已能成熟应用，而隐身衣则是重构波前引导波绕行实现相应需求，工业化尚且存在瓶颈。RCSR 技术是隐身工程的核心，其应用领域覆盖民用设施及前沿科技。当前已发表微波波段的 RCSR 文章如下：赵浥彤[16] 等构建了一种棋盘格超表面，在 6.5~20.0 GHz 频带内，实现 13.5 GHz 带宽的 RCSR；赵嘉成等[17] 设计了一款由超表面单元构成的 8×8 的超表面，实现了 13.8~18.7 GHz 频率范围的 RCSR；魏晨威等[18] 研究了由超表面单元构成 10×10 的棋盘型超表面，该超表面可实现 7.83 GHz的缩减带宽。目前存在的研究可以实现 RCSR，但是仍存在缩减带宽不足的核心挑战。

本文聚焦反射型器件提出一款实现交叉极化转换的三层超表面架构。该结构工作在 9.53~22.38 GHz 频带内，极化转换率高于 95% 且相对带宽为 12.85 GHz，并且在相应频带内展现出优异的入射角度鲁棒性，能适应更为复杂的电磁环境。进一步针对雷达隐身需求，通过超表面单元及其旋转结构的相位协同设计，构建具有电磁波能量重分布特性的阵列系统。该系统在 8.15~24.00 GHz 频率范围内雷达散射截面缩减小于 10 dB，相对带宽为 98%。两类功能化超表面通过参数优化形成互补，攻克了传统器件效率与带宽难以兼得的矛盾，以极化转换特性实现对电磁波的调控，为新一代智能通信系统与隐身装备的集成化设计提供了理论支撑和技术储备。

2 计算与结构设计

2.1 极化转换性能指标计算

设 y 极化波沿-z 轴方向入射至超表面结构。反射场由 x 和 y 两个分量组成。反射系数可定义为

$$\begin{cases} R_{yy} = \dfrac{|E_{ry}|}{|E_{iy}|} \\ R_{xy} = \dfrac{|E_{rx}|}{|E_{iy}|} \end{cases}, \tag{1}$$

式中：R_{yy} 为同极化反射系数；R_{xy} 为交叉极化反射系数；E_{ry}、E_{rx} 和 E_{iy}、E_{ix} 分别为 y 和 x 方向上的反射波和入射波。极化转换率 (Polarization conversion ratio, PCR) 用于检验线极化转换器性能的优劣[15]，其计算公式为

$$PCR = \frac{|R_{xy}|^2}{|R_{xy}|^2 + |R_{yy}|^2}, \tag{2}$$

式中：$|R_{yy}|$和$|R_{xy}|$分别表示对应的反射系数的幅值。

2.2 极化转换结构设计

所设计的极化转换器的单元结构如图 1 所示，该结构从下到上依次为底部金属层、Rogers-5880 介质层以及顶部镂空椭圆谐振层。其中，金属均是电导率为 5.8×10^7 S/m 的退火铜，Rogers-5880 的介电常数为

2.2，其中顶部金属谐振层厚度与底部金属层厚度一致，该结构最优参数如表 1 所示，其结构参数贯穿全文，其中 a 为椭圆贴片长轴，b 为椭圆贴片短轴，l 为镂空矩形长，w 为镂空矩形宽。

3 极化转换器结果与讨论

基于 CST 2022 仿真软件，对所设计的超表面单元仿真分析。相应的反射系数的仿真结果如图 2 所示。由图 2(a) 可知，所提出的超表面结构在 9.58 GHz 至 22.38 GHz 的宽频范围内，R_{yy} 值低于 0.2 同时 R_{xy} 值高于 0.95，表明其能高效地将 y 线极化波转换为与其正交的 x 极化波。如图 2(b) 所示，结构在 10.21 GHz、15.03 GHz、20.87 GHz、21.97 GHz 处产生谐振，谐振峰之间耦合使得同极化转换系数 R_{yy} 在 9.33~22.49 GHz 频带内低于−10 dB；图 3 为镂空椭圆的 PCR 和完整椭圆的 PCR 对比示意图，完整椭圆相较于镂空椭圆工作带宽变窄的同时 PCR 降低，该结果验证了所设计镂空椭圆结构的高效性，即在 9.53~22.38 GHz 频带内，PCR 超过 95% 的同时绝对带宽可达 12.85 GHz。

顶部结构的参数选择决定器件性能的好坏，利用控制变量法研究参数变化的影响如图 4 所示。图 4 中曲线为椭圆贴片长轴 a、短轴 b 和镂空矩形长 l、宽 w 取不同值时 PCR 的变化情况。由图 4(a) 可得，随

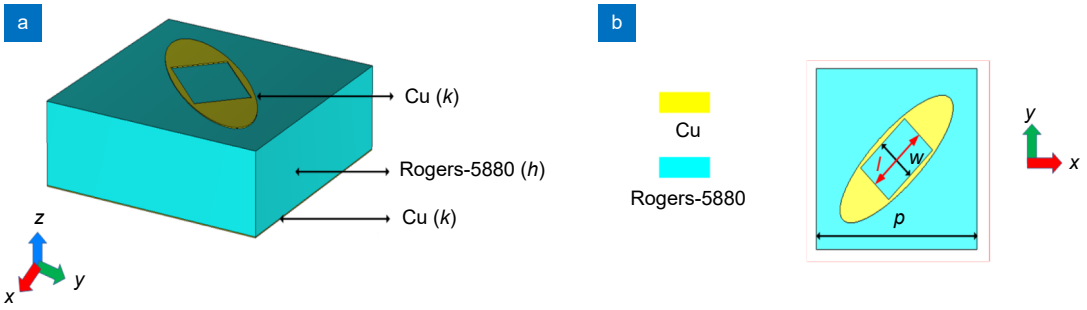


图 1 超表面单元结构示意图。(a) 立体图；(b) 单元俯视图

Fig. 1 Schematic diagram of metasurface unit cell structure. (a) Stereogram; (b) Top view of unit cell

表 1 超表面单元结构参数

Table 1 Parameters of metasurface unit cell structure

Parameters	Value/mm	Parameters	Value/mm
a	4.60	k	0.035
b	1.50	h	3.000
l	3.75	p	9.700
w	2.40	—	—

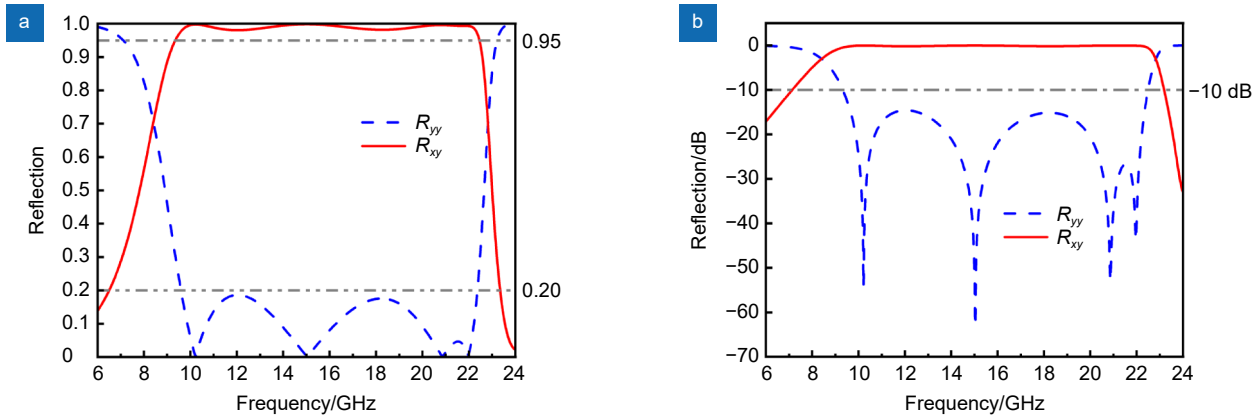


图 2 同极化和交叉极化反射系数。(a) 常数形式；(b) 对数形式

Fig. 2 Reflection coefficients of co-polarization and cross-polarization. (a) Constant form; (b) Logarithmic form

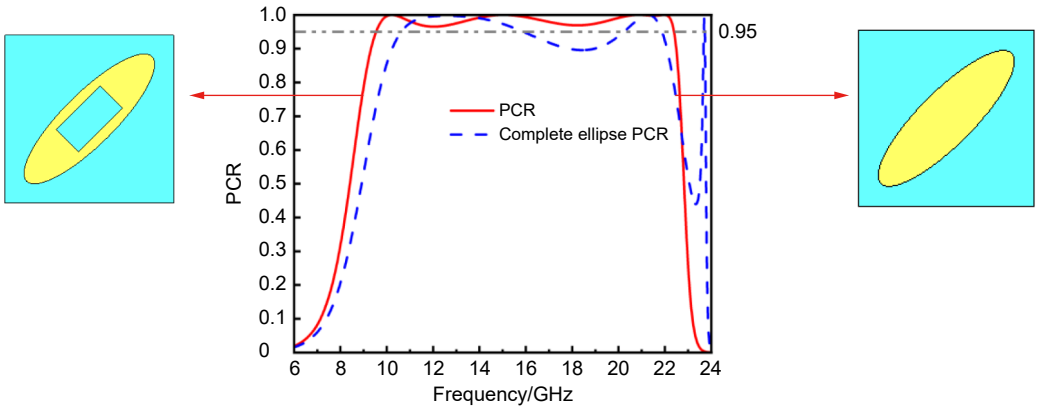


图 3 超表面单元极化转换率示意图

Fig. 3 Schematic diagram of polarization conversion ratio of metasurface cell

着 a 增大，转换带宽加宽，但当 a 大于 4.60 mm 时，该结构转换效率急速下降，性能降低。通过观察图 4(b) 可得，当 b 小于 1.50 mm 时，结构不满足谐振条件，极化转换率为 0；当 b 等于 1.50 mm 时，极化转换率大于 95% 且具有连续宽带的交叉极化转换；当 b 大于 1.50 mm 时，转换效率迅速下降且转换带宽较窄。由图 4(c) 可知，改变 l 会使高频处极化转换率发生变化，随着 l 减小，极化转换带宽拓宽，但高频处的转换率小于 90%，当 l 等于 3.75 mm 时，该器件兼具高 PCR 和宽带特性。分析图 4(d) 可得，w 变化对 PCR 的高低影响效果较为显著，仅 w 为 2.40 mm 时，其 PCR 高于 95%。综上，参数优化后选择最佳值为 a=4.60 mm、b=1.50 mm、l=3.75 mm、w=2.40 mm。

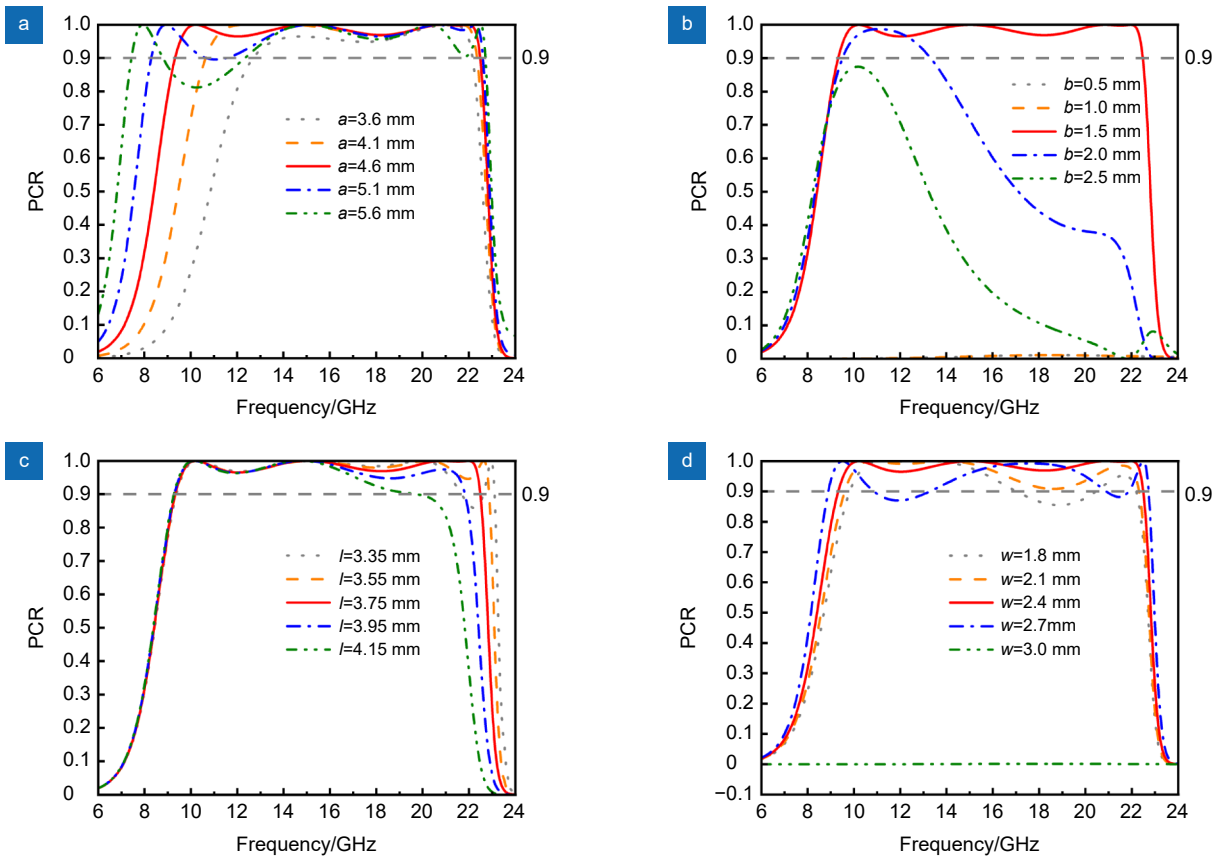


图 4 结构参数对 PCR 的影响。(a) a; (b) b; (c) l; (d) w

Fig. 4 Impact of structural parameters on PCR. (a) a; (b) b; (c) l; (d) w

不同入射角度对极化转换性能的影响如图 5 所示。由图 5 可知，随着入射角由 0°增大至 30°，顶部金属谐振结构的等效电尺寸变化，致使金属表面的电磁响应特性减弱，转换带宽变窄，但其 PCR 在 9.13~17.41 GHz 频带内仍大于 80%，由此可得，极化转换器对入射角度具有极化不敏感性。图 6 展示了极化角对极化转换性能的影响，该图表明，所设计的结构可使 y 偏振波转变为 x 偏振波，充分验证了该结构高效的转换特性。

表 2 展示了该超表面结构与已报道其他文献的对比。由表 2 可知，该超表面结构表现出区别于其他结构的优势，可以在 12.85 GHz 的宽频带内实现极化转换率高于 95% 的交叉极化转换。

分别在四个谐振峰处设置监视器进行全面的表面电流分析，仿真计算结果如图 7 所示，其中第一行、第二行分别为金属谐振层和底部金属底板上的电流分布。由图 7(a) 可知，在激励波激励后，其上下两层的表面电流在 x 和 y 轴方向上反向，激发可引起强烈的磁共振的磁偶极子，产生与入射电场方向呈平行态的磁场，达到转换的目的。如图 7(b)，顶部谐振层左上的表面电流与底部金属层的表面电流在 y 轴上同向产生电偶极子，x 轴上反向形成磁偶极子，从而在该点产生谐振。由图 7(c) 可得，在该频点处激励波激励产生顶部和底部相同流向的电流，形成电偶极子，其强烈的电共振促使产生的感应电场与入射电场方向正交，实现极化转换，图 7(d) 同理。综上，超高效率的极化转换得益于电偶极子与磁偶极子的共同作用。

4 基于超表面的雷达散射截面缩减

将所设计的超表面单元逆时针旋转 90°制成镜面超表面单元以研究二者之间的联系。由图 8(a) 和图 8(b) 可知，超表面单元与其镜像单元具有相同的反射系数值，但存在 180°相位差，因此可实现目标 RCS 的最小化[14]。为此，设计了一个 6×6 棋盘形状的超表面，以研究超表面的 RCS 还原能力，如图 9 所示。

以相同尺寸的金属板 (PEC) 为参考，研究单站 RCS 的缩减性能如图 10 所示，其中图 10(a) 和图 10(b) 分别为棋盘型超表面与相同尺寸 PEC 及其归一化的

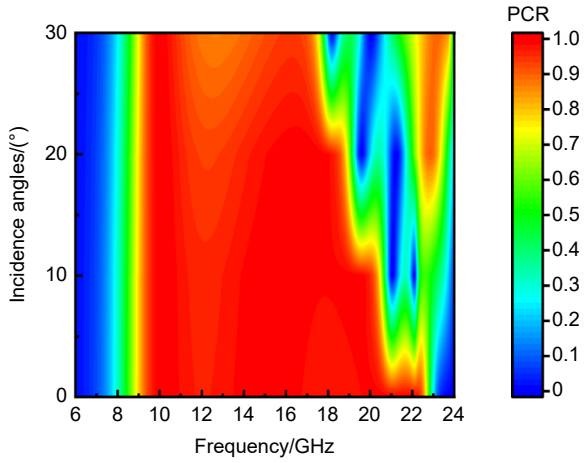


图 5 入射角度对极化转换率的影响

Fig. 5 The influence of the incident angle on the polarization conversion rate

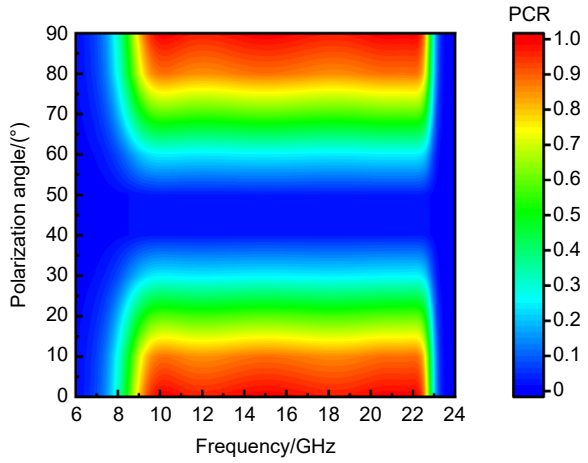


图 6 极化角度对极化转换率的影响

Fig. 6 The influence of polarization angle on the polarization conversion rate

表 2 交叉极化转换器性能对比

Table 2 Performance comparison of cross-polarization converters

Literature	Working bandwidth/GHz	Bandwidth/GHz	Relative bandwidth/%	PCR/%
Ref. [12]	7.00~19.50	12.50	94.33	> 90
Ref. [13]	7.88~20.70	12.82	89.71	> 90
Ref. [14]	8.50~25.50	17.00	100.00	> 90
Ref. [15]	6.00~14.00	8.00	80.00	> 90
This paper	9.53~22.38	12.85	80.53	> 95

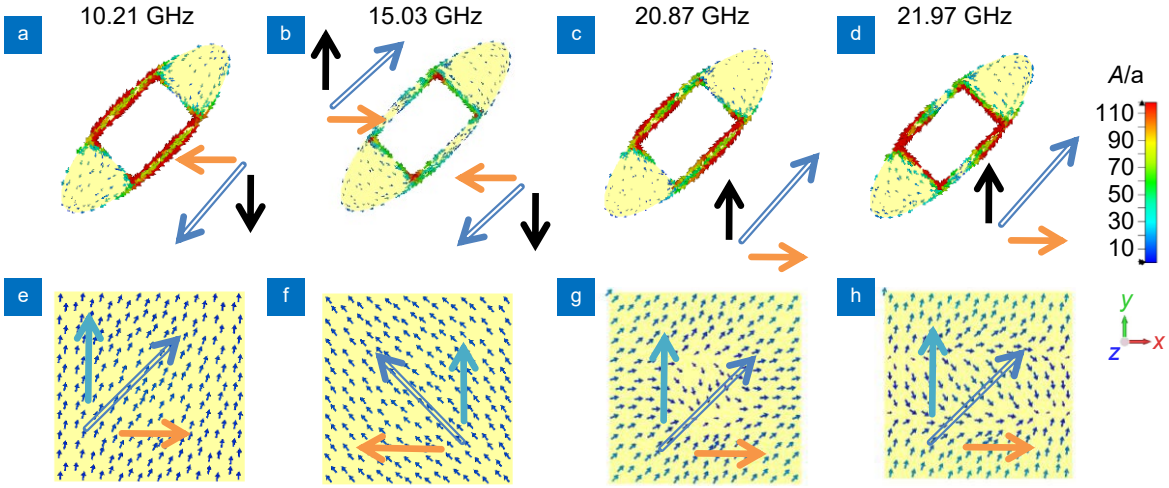


图 7　谐振峰处表面电流分布。(a, e) 10.21 GHz; (b, f) 15.03 GHz; (c, g) 20.87 GHz; (d, h) 21.97 GHz

Fig. 7　Surface current distribution at resonance peaks. (a, e) 10.21 GHz; (b, f) 15.03 GHz; (c, g) 20.87 GHz; (d, h) 21.97 GHz

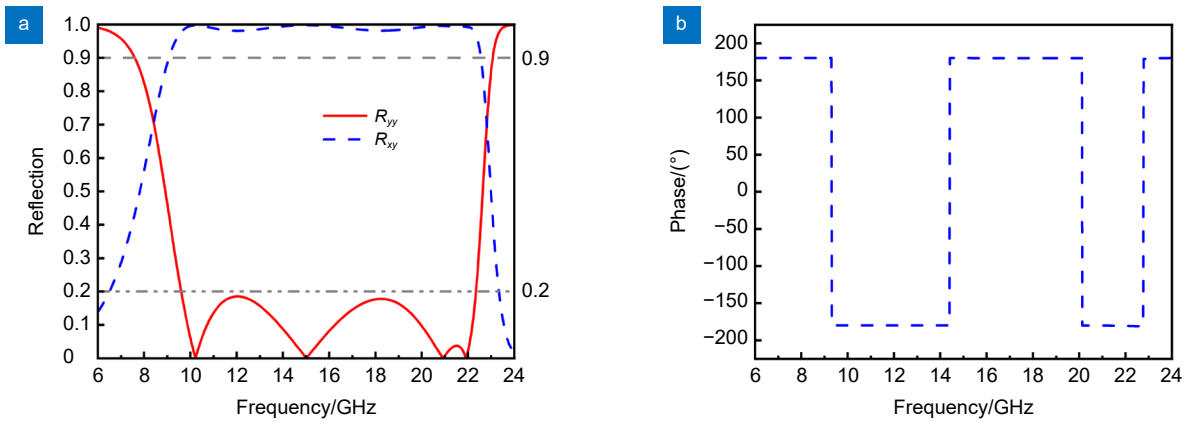


图 8　仿真结果。(a) 旋转后结构的反射系数; (b) 单元与旋转单元相位差

Fig. 8　Simulation results. (a) Reflection coefficient of the metasurface unit after rotation; (b) Phase difference between the original metasurface unit and the rotated metasurface unit

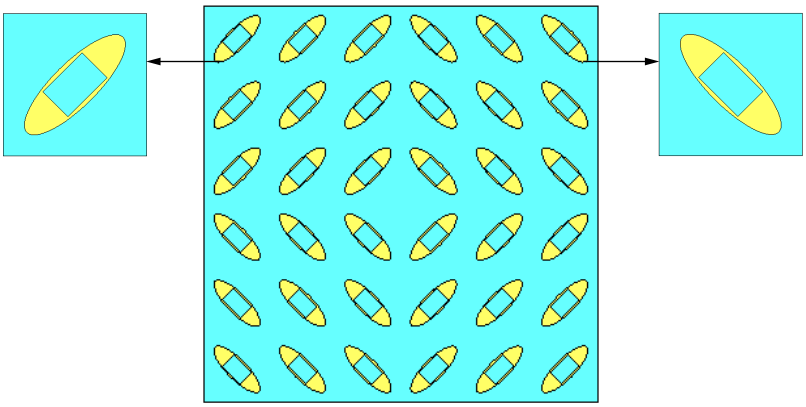


图 9　6×6 单元格阵列俯视图

Fig. 9　Top-view of a 6×6 unit cell array

RCS 示意图。由图 10 可知，在 8.15~24.00 GHz 频带内，该系统的 RCS 小于 10.00 dB，且在 15.70 GHz 处，RCSR 可达 22.84 dB。实现该功能源于超表面单元存在高效的极化转换功能，其原结构与旋转结构存在 180°相位差，实现局部相消干涉，因此，增强了 RCS 的缩减效果。本文与其他已报道文章的 10 dB RCS 缩减性能对比如表 3 所示。

如图 11 为阵列的 3D 散射图案，其中图 11(a-d) 为所设计超表面的散射图，与之对应的图 11(e-h) 为其相应纯金属板的散射图。由图 11(a-d) 可知，阵列超表面将入射到该表面的波进行反射，其反射波沿不同的多个方向散射，完成了能量重分布，将原本集中反射回雷达接收方向的能量，分散到其他非威胁方向，从而显著降低雷达可探测到的回波强度，最终实现 RCS 缩减。图 11(e-h) 表明来自 PEC 的反射波在源方向上的一个强波瓣中被反射回来，能量集中在一个方

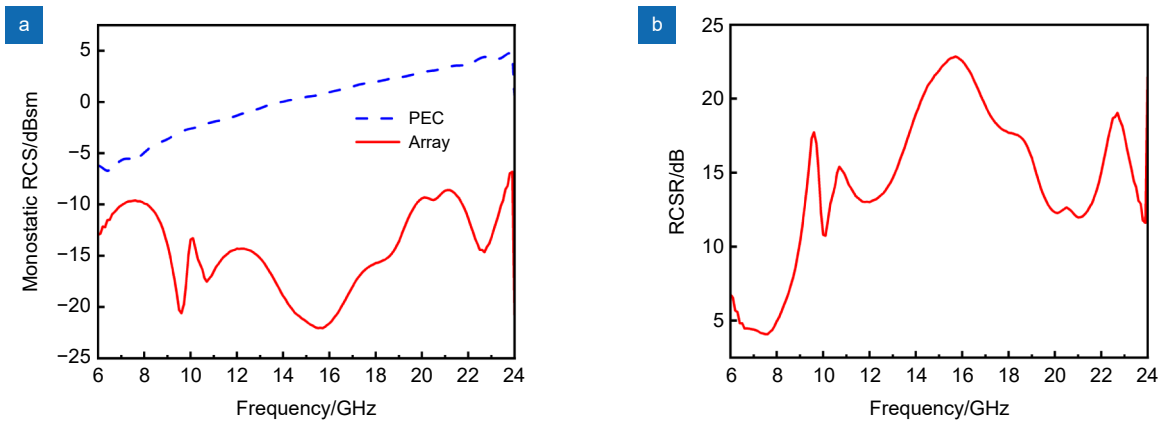


图 10 单站 RCS 缩减的模拟示意图。(a) 棋盘状超表面对比 PEC; (b) 棋盘型超表面相对于 PEC 的归一化 RCS

Fig. 10 Simulation schematic of monostatic RCS reduction. (a) Chessboard metasurface and PEC of the same size; (b) Normalized RCS of the chessboard metasurface relative to PEC

表 3 本文与已报道文章的 RCS 缩减对比

Table 3 Comparison of RCS reduction between this work and reported articles

Literature	Operating bandwidth/GHz	Fractional bandwidth/%	Reduction bandwidth
Ref. [18]	6.50-20.00	98.14	13.50
Ref. [19]	13.80-18.70	30.15	4.90
Ref. [20]	10.60-18.43	53.90	7.83
This paper	8.15-24.00	98.63	15.85

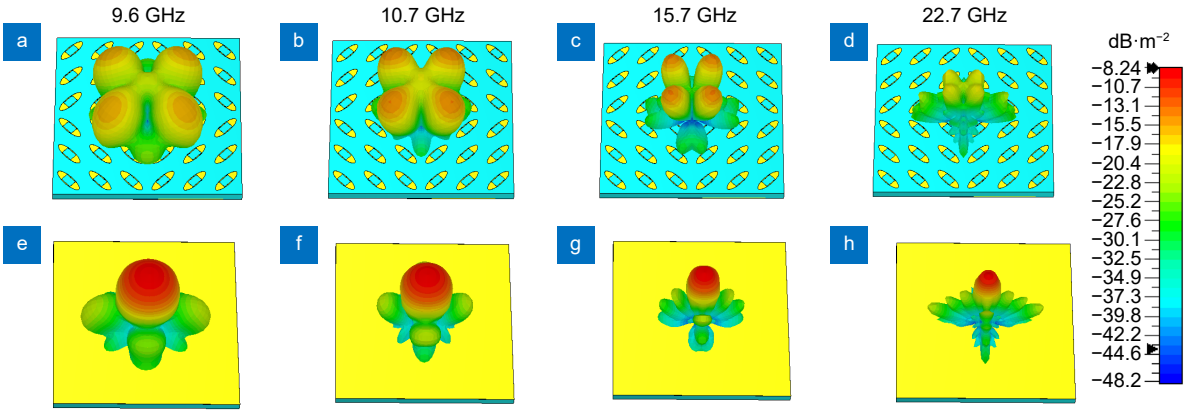


图 11 3D 散射场。(a, e) 9.6 GHz; (b, f) 10.7 GHz; (c, g) 15.7 GHz; (d, h) 22.7 GHz

Fig. 11 3D scatter field. (a,e) 9.6 GHz; (b, f) 10.7 GHz; (c, g) 15.7 GHz; (d, h) 22.7 GHz

向，因而在雷达接收端形成高强度回波，导致 RCS 显著增大，使目标极易被探测。综上，该结构可广泛应用于雷达隐身。

5 结 论

针对电磁波极化转换极化带宽窄、极化转换率低、体积大难以集成以及功能单一的问题，基于超表面结构设计了一种用以宽带极化转换的单元以及可实现雷达散射截面缩减的阵列。通过仿真可得，该极化转换器在 9.53~22.38 GHz 的超宽频带内极化转换率高于 95% 并且在 0°到 30°入射角范围内具有极化不敏感性。此外，由相位差为 180°的超表面单元及其旋转单元构成的 6×6 棋盘型阵列，其在 8.15~24.00 GHz 频段内雷达散射截面缩减小于 10 dB，相对带宽可扩展至 98%，在 15.7 GHz 处，RCSR 可达 22.84 dB。该研究不仅能高效的转换线极化波，还为新一代宽带通信系统与隐身装备提供了高兼容性的解决方案，展现了超材料在多功能电磁器件开发中的巨大潜力与工程应用价值，可广泛应用于电磁波调控、雷达探测、天线增益增强等诸多领域。

作者贡献

马依泽：研究资料的收集、分析，论文写作；李春树、马鑫：指导论文选题、论文修改；冯迪：研究资料的收集。

利益冲突

所有作者声明无利益冲突

参考文献

[1] Xu J, Li R Q, Jiang X P, et al. Ultra-wideband linear polarization converter based on square split ring[J]. *Acta Phys Sin*, 2019, **68**(11): 117801.
徐进, 李荣强, 蒋小平, 等. 基于方形开口环的超宽带线性极化转换器[J]. 物理学报, 2019, **68**(11): 117801.

[2] Wang H, Wei Y S, Li X, et al. Design of high-efficiency high-power circular polarization converter based on metasurface[J]. *J Optoelectron·Laser*, 2025: 1−8.
王皓, 韦艳莎, 李鑫, 等. 基于超表面的高效高功率圆极化转换器设计[J]. 光电子·激光, 2025: 1−8.

[3] Zhou H Y, Fu C F, Zhang Y C, et al. Design of a dual-band polarization converter based on chiral metasurface[J]. *J Optoelectron·Laser*, 2025, **36**(7): 688−695.
周海燕, 付长凤, 张易成, 等. 基于手性超构表面的双频带极化转换器设计[J]. 光电子·激光, 2025, **36**(7): 688−695.

[4] Jiang Y N, Li M J, Wang J, et al. A metamaterial-based cross-polarization converter characterized by wideband and high efficiency[J]. *Crystals*, 2023, **13**(1): 17.

[5] Kong C Y, Guo Q X, Li Z R, et al. Wideband RCS reduction based on polarization conversion metasurface[C]//*2016 11th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE)*, 2016: 696–698.
https://doi.org/10.1109/ISAPE.2016.7834051.

[6] Deng Z H, Wang F W, Ren Y H, et al. A novel wideband low-RCS reflector by hexagon polarization rotation surfaces[J]. *IEEE Access*, 2019, **7**: 131527−131533.

[7] Zhang B C, Jin C, Yin L Y, et al. Diffusive-reflective metasurface with dual independent reflection bands for RCS reduction[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2022, **21**(3): 635−639.

[8] Abdullah M, Koziel S. Surrogate-assisted design of checkerboard metasurface for broadband radar cross-section reduction[J]. *IEEE Access*, 2021, **9**: 46744−46754.

[9] Samadi F, Sebak A. Wideband, very low RCS engineered surface with a wide incident angle stability[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2021, **69**(3): 1809−1814.

[10] Xu R, Wang W, Chen S R, et al. Design of a reflective metasurface terahertz broadband polarization converter[J]. *J Microwaves*, 2024, **40**(S1): 280−283.
徐瑞, 王伟, 陈顺荣, 等. 一种反射型超表面太赫兹宽带极化转换器设计[J]. 微波学报, 2024, **40**(S1): 280−283.

[11] Pan W, Li Y R, Zhang Z, et al. Design and analysis of a multi-band and dual-functional terahertz wave polarization converter based on asymmetric cross-shaped metasurface[J]. *Optics Commun*, 2023, **530**: 129171.

[12] Xu J, Li R Q, Qin J, et al. Ultra-broadband wide-angle linear polarization converter based on H-shaped metasurface[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(16): 20913−20919.

[13] Wang S B, Wang G M, Guo W L, et al. Design of high-efficiency wideband cross polarization convertor based on metasurface[J]. *J Microwaves*, 2018, **34**(4): 60−64.
王世彬, 王光明, 郭文龙, 等. 基于超构表面的高效宽带交叉极化转换器设计[J]. 微波学报, 2018, **34**(4): 60−64.

[14] Aziz A, Kamal B, Faraz Z, et al. Wideband and high efficient polarization conversion and RCS reduction based on compass needle shape metasurface[J]. *Opt Laser Technol*, 2024, **177**: 111145.

[15] Zhang S, Cao W W, Xie X, et al. Design of cross polarization converter based on metasurface[J]. *Electron Compon Mater*, 2024, **43**(2): 223−229.
张胜, 曹为为, 解鑫, 等. 基于超表面的交叉极化转换器设计[J]. 电子元件与材料, 2024, **43**(2): 223−229.

[16] Zhao Y T, Wang G L, Tang X Z, et al. Design of broadband polarization conversion metasurface for X and Ku bands and RCS reduction applications[J]. *Aeronaut Sci Technol*, 2024, **35**(2): 100−105.
赵浥彤, 王钢林, 唐兴中, 等. X 及 Ku 波段宽带极化转换超表面设计及 RCS 缩减应用[J]. 航空科学技术, 2024, **35**(2): 100−105.

[17] Zhao J C, Hu W, Hu D C, et al. Broadband RCS reduction chessboard metasurface based on polarization conversion[J]. *J Microwaves*, 2024, **40**(S1): 252−255.
赵嘉成, 胡巍, 胡大成, 等. 基于极化转化的宽带 RCS 缩减棋盘超表面设计[J]. 微波学报, 2024, **40**(S1): 252−255.

[18] Wei C W. Research on the realization of broadband high-

performance metasurface polarizer and low RCS[D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2024. https://doi.org/10.27759/d.cnki.ggxgx.2024.000533.
魏晨威. 宽带高性能超表面极化器及低 RCS 实现研究[D]. 柳州: 广西科技大学, 2024. https://doi.org/10.27759/d.cnki.ggxgx.2024.000533.

[19] Indhu K K, Abhilash A P, Anilkumar R, et al. Simplistic metasurface design approach for incident angle and polarization insensitive RCS reduction[J]. *Sci Rep*, 2024, **14**(1): 21964.

[20] Wang Z, Luo Y, Kou J Q, et al. Design of broadband high efficiency linear polarization converter based on metasurface[J]. *Electron Compon Mater*, 2021, **40**(2): 163−167,178.
汪竹, 罗燕, 寇家琪, 等. 基于超表面的宽带高效线极化转换器设计[J]. 电子元件与材料, 2021, **40**(2): 163−167,178.

作者简介



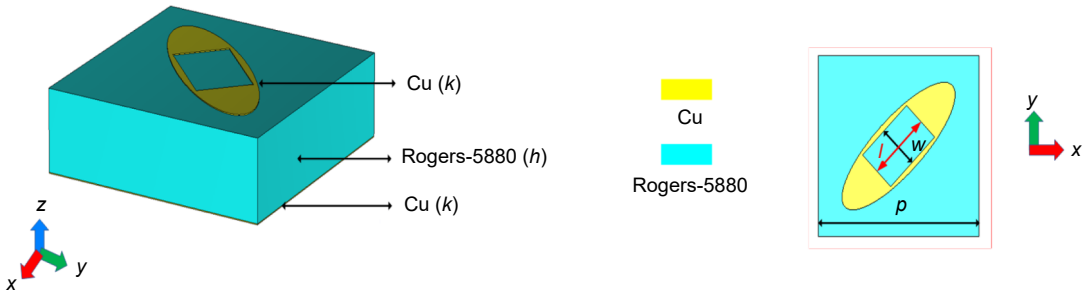
【通信作者】马依泽 (2001-)，女，硕士研究生，主要从事电磁超材料、超材料器件研究。

E-mail：18795134427@163.com

扫描二维码，获取 PDF 全文

Design of polarization conversion and radar cross-section reduction based on metasurfaces

Ma Yize*, Li Chunshu, Ma Xin, Feng Di



Schematic diagram of metasurface unit cell structure

Overview: To address the limitations of conventional electromagnetic polarization converters, such as narrow bandwidth, low efficiency, large physical size, and limited functionality, this study proposes an integrated multifunctional solution based on a metasurface structure. The research aims to design a composite device capable of simultaneously achieving broadband and high-efficiency polarization conversion along with radar cross-section reduction, thereby meeting application requirements in modern communication systems and radar stealth technology. In terms of methodology, a three-layer metasurface unit structure operating in the microwave band is designed, as shown in Fig. 1(a), to achieve efficient cross-polarization conversion. The structural parameters are defined as follows: the periodic length of the ellipse is p=9.700 mm, the semi-major and semi-minor axes of the ellipse are a=4.600 mm and b=1.500 mm, respectively. The length and width of the hollow rectangular slot are l=3.750 mm and w=2.400 mm, and the thicknesses of the top resonant layer and the bottom metal plate are both k=0.035 mm. The thickness of the dielectric layer is h=3.000 mm. To further extend its application in stealth technology, a 6×6 checkerboard array is constructed by combining metasurface units with a 180° phase difference and their rotated variants. Simulation results demonstrate that the proposed metasurface polarization converter exhibits a polarization conversion ratio exceeding 95% within the frequency band of 9.53 GHz to 22.38 GHz, with an operational bandwidth of 12.85 GHz, indicating outstanding broadband characteristics. Moreover, the structure maintains excellent angular stability for incident angles up to 30°, with polarization conversion ratio consistently above 80%. In terms of radar cross-section reduction performance, the checkerboard array achieves an RCS reduction of less than −10 dB over an ultra-wide frequency range from 8.15 GHz to 24.00 GHz, with a relative bandwidth of up to 98%. A peak RCS reduction of 22.84 dB is achieved at 15.7 GHz, demonstrating remarkable broadband radar scattering control capability. Overall, the proposed design method exhibits comprehensive advantages including broad bandwidth, high efficiency, low profile, and low cost. It enables efficient linear polarization conversion while offering a highly compatible solution for the development of broadband communication systems and stealth equipment. The findings fully demonstrate the significant application potential of metasurface technology in developing multifunctional electromagnetic devices, providing valuable insights for the engineering application of next-generation electromagnetic wave manipulation.

Ma Y Z, Li C S, Ma X, et al. Design of polarization conversion and radar cross-section reduction based on metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, **52**(10): 250183; DOI: 10.12086/oee.2025.250183

Foundation item: Project supported by National Natural Science Foundation of China (42361075)
School of Electronics and Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China
* E-mail: 18795134427@163.com