

X及Ku波段宽带极化转换超表面设计及RCS缩减应用



赵浥彤,王钢林,唐兴中,李岩

中国航空研究院,北京 100029

摘要:针对反高分辨率雷达探测的电磁隐身问题,本文设计了一种作用于X和Ku波段的宽带反射型极化转换超表面,能够在6.5~8GHz范围内实现85%以上的极化转换效率,在8~20GHz范围内实现90%以上的极化转换效率,极化转换效率在85%以上的相对带宽达到了101%,且超表面剖面较低,整体厚度小于3.6mm,并将其自身和镜像单元设计成了方形式和三角式棋盘阵列排布结构。在x极化和y极化电磁波垂直入射下,与同等大小金属相比,两种棋盘式阵列排布结构的雷达截面积(RCS)缩减效果明显,且具有极化不敏感的特性,其中方形式棋盘结构RCS缩减峰值达到了22.91dB,RCS减缩均值达到了11.73dB;三角式棋盘结构RCS缩减峰值达到了36.07dB,RCS减缩均值达到了12.29dB,起到了大幅度降低单站RCS提升电磁隐身性能的作用。

关键词:极化转换超表面;雷达截面积;极化转换效率;人工磁导体;棋盘式排布

中图分类号:TN015

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.02.012

近年来,电磁超表面因其具备的独特电磁特性及其人为可设计性成了研究的热点方向。电磁超表面通常由特殊的金属形状排布成周期或非周期的形式构成,多采用二维平面结构形式,其具备自然材料不具备的诸多电磁特性,其单元结构和单元间排布方式决定了其具有较大的设计空间,与电磁波作用后可发生诸多奇异的电磁现象。目前,针对超表面电磁调控的研究包含电磁波幅度的调控、电磁波相位/波前的调控和电磁波极化方式/方向的调控等。目前常见的电磁超表面包含频率选择表面、超材料吸波体、极化转换表面和相位梯度表面等。各类超表面蕴含的设计机理各不相同。由于电磁超表面具有较强的人工可设计性,其在电磁隐身领域也成了热点研究方向,其核心问题在于研究目标的雷达截面积(RCS)。RCS并不真实存在,它表征一个等效面积的概念,即当目标被电磁波照射时,目标向单位立体角范围内散射的电磁功率与其所获得的功率密度之比。RCS有单站和双站之分,当探测雷达的发射和接收天线处在同一位置时测得的RCS为单站RCS,当探测雷达的发射和接收天线处在不同位置时测得的RCS为双站RCS,RCS的高低直接决定了隐身性能的优劣,进而影响飞机的

生存力。另外,在雷达探测领域,由于X和Ku波段具有较高的成像分辨率,同时能够兼顾较大的探测距离、低衰减等因素,因此经常作为重要的雷达探测频点,所以从反侦察、反锁定的角度而言,X和Ku波段的隐身就成了重中之重。因此,电磁超表面由于其具备的电磁场调控能力在RCS减缩领域逐步崭露头角。

早期基于相位相消原理的人工磁导体(AMC)棋盘结构引起了学者们的极大关注,其能够通过AMC和完美电导体(PEC)的结合,在反射波之间产生180°相位差,排列成棋盘式结构时,反射波电场分量相消干涉,从而降低后向散射RCS^[1-5]。后来研究发现对于PEC材料,其反射相位能够保持在稳定的数值,但AMC单元的反射相位随频率变化较大,通常仅在很窄的频带内可以保持接近180°的相位差,这就限制了AMC棋盘结构在RCS减缩方面的应用,后来学者利用两种类型组合的AMC来替换AMC与PEC的组合结构,两种AMC的相频特性均随着频率变化,且通过人工设计可以使二者在一定宽带条件下的变化趋势接近,相位差保持在180°左右,再将两种AMC排列成棋盘式结构,能够在一定带宽条件下使反射波发生相位相消,拓展RCS减

收稿日期: 2023-07-21; 退修日期: 2023-12-05; 录用日期: 2024-01-11

引用格式: Zhao Yitong, Wang Ganglin, Tang Xingzhong, et al. Design of broadband polarization conversion metasurface for X and Ku bands and RCS reduction applications[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(02): 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(02): 100-105.

缩的带宽。其缺点是实现 RCS 的减缩需要设计两种类型的超表面单元,“相位差数值稳定”“相频特性变化趋势一致”等设计目标难度较高,工作量大,结构形式复杂。

近年来,极化转换超表面(PCM)进入了诸多学者的视野,它是一种改变电磁波极化方式、极化方向的超表面,主要包含“线—线”极化转换、“线—圆”极化转换及圆极化波“旋向”转换等方面。依据具体的结构形式,PCM 超表面包含透射型和反射型,透射型一般相对带宽较窄,反射型作用频带较宽。在隐身领域的应用方面,极化转换超表面与人工磁导体(AMC)一直是重点研究的对象,与 AMC 不同,极化转换超表面仅需一种单元即可实现 180° 相位差,其单元自身与镜像单元天然形成 180° 相位差,且反射型极化转换超表面能够保证较宽的工作频带,因此就保证了宽带的近 180° 相位差,解决了 AMC 超表面的设计痛点。因此,将 PMC 与其镜像单元进行棋盘式排布,能够获得宽带的 RCS 减缩效果。基于极化转换超表面的科研成果层出不穷。2015 年,东南大学 Gao Xi 等^[6]提出了一种双 V 结构形式的“线—线”极化转换超表面,在 12~27GHz 频率范围内取得了 90% 的极化转换效率,且结构形式简单易于实现;2016 年,西安电子科技大学 Liu Ying 等^[7]提出一种类“鱼骨”式的极化转换超表面,并在天线的 RCS 减缩方面进行了应用,取得了较好的效果;2021 年,潘晨清等^[8]提出了一种开孔式方型贴片极化转换超表面,其极化转换的 -5dB 带宽为 7.6~21.4GHz;重庆邮电大学汪竹等^[9]提出了一种 H 开口环叠加椭圆金属片式极化转换超表面,在 10~22GHz 频带内实现了 95% 的极化转换效率;国外学者 M. S. Ibrahim^[10]提出了一种“多线条”形式的极化转换超表面,在 15~52GHz 范围内实现了接近 100% 的极化转换效率。

本文依据极化转换原理设计了一种宽带高效的极化转换超表面单元,聚焦于雷达探测的关键频段(X 和 Ku 波段),并通过棋盘式阵列排布设计将单元组成阵列应用于雷达隐身领域,达到降低单站 RCS 的目的。

1 极化转换超表面设计

1.1 极化转换超表面单元设计

设计的极化转换超表面单元采用三层结构形式,由上层金属贴片、介质基板以及金属反射板组成。上层金属贴片包含外层开口圆环、内层圆环及中间连接线框,其材质为铜,为了保证其对 x 极化和 y 极化波具有相同的反射特性,单元分布沿 45° 方向镜像对称,厚度为 0.017mm,单元的长和宽均为 7.4mm,外层开口圆环的外径为 3.2mm、宽度为

0.25mm,圆环开口张角为 29.25° ,内层圆环外径为 1.35mm、宽度为 0.26mm,连接内外圆环的金属线条宽度为 0.25mm;中间材料为介质基板,采用 Rogers RT/duroid 5880(tm),其介电常数实部 2.2,损耗角正切为 0.0009,板材厚度为 3.52mm;最底层为金属反射板,实现电磁波的全反射,材质为铜,厚度为 0.017mm。其结构示意图如图 1 所示。

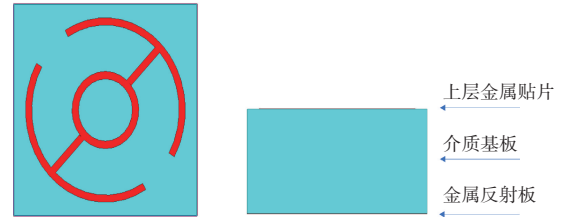


图1 超表面结构示意图

Fig.1 Metasurface structures

对设计的超表面单元进行仿真计算,得到其线极化波入射下的共极化反射系数和交叉极化反射系数如图 2 所示。由图 2 可以看出,该单元在 8~20GHz 范围内共极化反射系数低于 -10dB,在 6.5~8GHz 范围内共极化反射系数低于 -8.5dB,有较好的极化转换效果,该超表面在 6.6GHz、9.1GHz、14.3GHz 和 19.2GHz 附近实现了谐振,谐振点处共极化分量几乎被全部偏转至交叉极化方向,此时共极化分量最小,交叉极化分量最大,实现了理想的极化转换。

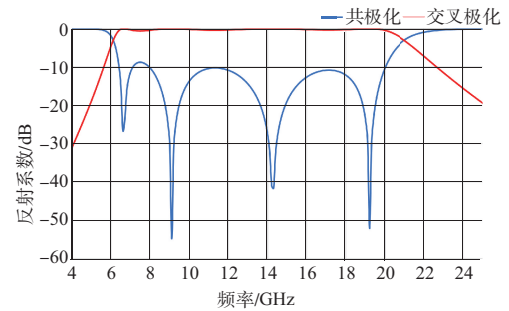


图2 超表面单元共极化和交叉极化反射系数

Fig.2 Metasurface cell reflection amplitude for co-polarization and cross-polarization

评价极化转换超表面性能优劣,通常采用极化转换效率^[11](PCR)指标,PCR 定义为

$$\text{PCR} = |\Gamma_{yx}|^2 / (|\Gamma_{yx}|^2 + |\Gamma_{xx}|^2) \quad (1)$$

式中, $\Gamma_{yx} = |E_y^r|/|E_x^i|$; $\Gamma_{xx} = |E_x^r|/|E_x^i|$, E_x^i 表示 x 极化入射波电场分量, E_y^r 表示 y 极化反射波电场分量, E_x^r 表示 x 极化反射波电场分量。绘制单元的极化转换效率(PCR)随频率变化曲线如图 3 所示,可以发现,在 8~20GHz 范围内其极化转换

效率均大于90%,在6.5~8GHz范围内其极化转换效率均大于85%,实现了较高的极化转换效率,其中极化转换效率大于85%的相对带宽为101.8%,极化转换效率大于90%的相对带宽为85.7%。

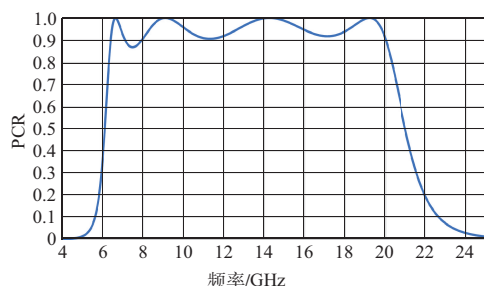


图3 极化转换效率

Fig.3 Polarization conversion ratio

1.2 极化转换超表面原理分析

单元设计采用对称式结构,即单元沿着 $y=x$ 直线(与 x 轴成 45° 夹角)成镜像对称方式,这里定义 uv 坐标系, u 轴与 v 轴分别与 x 轴、 y 轴成 45° 夹角,这里对 u 极化和 v 极化电磁波入射下单元的反射幅度和相位进行了仿真,从中可以发现,在6.5~20GHz的工作频带内,在入射波分别为 u 极化和 v 极化的情况下,二者反射系数幅度几乎相等,频带内大部分范围近于0,最小值也大于 -0.1dB ;二者频带内的反射相位具有较好的线性度,相位随频率变化的趋势高度一致,且二者反射相位差保持在 180° 左右,这样能够确保该极化转换超表面在很宽的频率范围内实现较高的极化转换效率,如图4、图5所示。

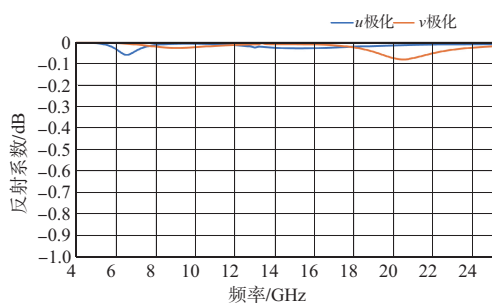


图4 u 、 v 极化下超表面单元反射系数

Fig.4 Metasurface cell reflection amplitude under u and v polarization

那么当电磁波为 x 或 y 极化入射时,入射场可以分解为沿 u 、 v 方向幅度和相位相同的两个分量,经超表面反射后,原本同相位的两个分量变为相位差 180° 左右,并且反射幅度保持一致,此时沿 xy 坐标系叠加反射场矢量,可以发现同极化反射波分量发生相位相消最终被削弱,而交叉极化反射波

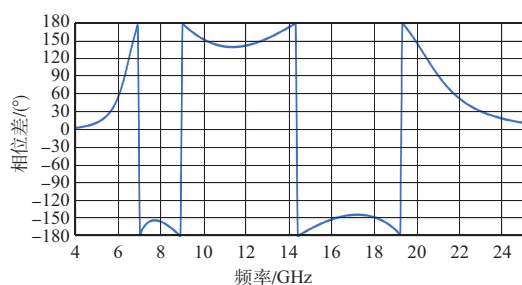


图5 u 、 v 极化下超表面单元反射相位

Fig.5 Metasurface cell reflection phases under u and v polarization

分量产生同相叠加最终获得了增强,最终叠加形成的反射波由交叉极化分量主导,即由原本的 $x(y)$ 极化变成了 $y(x)$ 极化,从而实现了高效率的极化转换,原理示意如图6所示。图6中以入射波 x 极化为例,首先将入射波电场矢量 E_i 沿 u 、 v 方向分解为 E_{iu} 和 E_{iv} 分量,入射到超表面经反射后,这里假设 u 方向反射相位与入射相位反向,如图6中 E_{ru} 线条所示,由于 u 方向和 v 方向的反射相位差 180° ,因此 v 方向反射相位与入射相位相同,如图6中 E_{rv} 线条所示, E_{ru} 和 E_{rv} 电场叠加后最终形成的反射电场 E_r 沿 y 方向振荡,因此发生了交叉极化。

需要特殊说明的是,当电场分量不在 xy 轴系上时,可以按照图6的方式依据矢量图解法推理,超表面单元的 E_r 极化方向会与 xy 坐标轴成一定夹角,且 E_r 与 E_i 会沿 45° 或 -45° 直线成轴对称,同样发生了极化方向的转换。

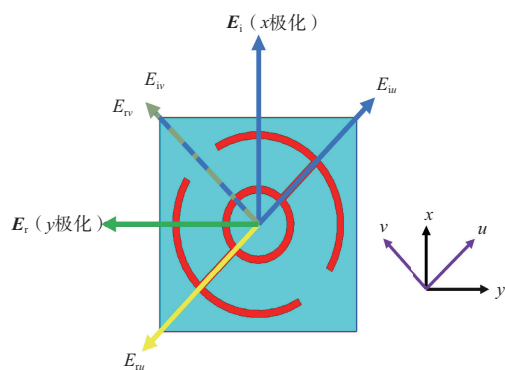


图6 超表面单元作用原理示意

Fig.6 Explanation of the metasurface principle

2 棋盘式排布设计

对于 x 极化的入射电磁波,RCS可以表示为

$$\text{RCS} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R \frac{|E_y|^2}{|E_x|^2} \quad (2)$$

对于同极化分量,单站RCS的减缩以同尺寸金属平板

为参考对照,具体的 RCS 减缩(RCSR)数值可以表示为

$$\begin{aligned} \text{RCSR} &= 10\lg\left(\frac{\lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_{\text{pcm}}^s|^2}{|E^i|^2}}{\lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_{\text{metal}}^s|^2}{|E^i|^2}}\right) = 10\lg\left(\frac{|E_{\text{pcm}}^i|^2}{|E_{\text{metal}}^i|^2}\right) = \\ &10\lg\left(\frac{|E_x^i \Gamma_{xx}|^2}{|E_x^i|^2}\right) = 10\lg(1 - \text{PCR}) \end{aligned} \quad (3)$$

对于交叉极化分量,采用相位相消的方式相互抵消其电场分量,大体上采用 $0, \pi$ 交替分布式的排列结构,相邻单元相位差均保持在 180° 左右,其中 0 相位单元由 PCM 单元自身实现, π 相位单元由 PCM 单元的镜像单元实现,那么对于入射的线极化波,经过 PCM 超表面及其镜像单元反射后,作用频带内大部分电场转化为交叉极化分量,二者的交叉极化分量反相,互相抵消,进而 RCS 获得了显著降低。

对于电场极化方向与 xy 坐标系成一定夹角的情况,依据矢量图解法可以推断,PCM 单元自身和其镜像单元的 E_z 矢量依旧保持共线的关系,即沿着与 xy 坐标系成一定夹角的直线,且相位差保持在 180° ,棋盘式排布同样可以相位相消降低电场幅度,从而减缩阵列的 RCS。

2.1 方形棋盘式排布

方形棋盘式排布是指采用类似平面阵列差波束的形式,将平面区域沿着正交的坐标轴分割成正方形子阵,再将超表面和其镜像单元交叉排布,顶点相对的区域采用相同的单元,阵面上单元沿着经过阵列中心的两条对角线成轴对称形式。这里选取 16×16 的平面阵列,具体如图 7 所示。整体阵面尺寸为 $118.4\text{mm} \times 118.4\text{mm}$ 。

2.2 三角棋盘式排布

三角棋盘式排布是指采用与坐标轴成 $\pm 45^\circ$ 的两条对角

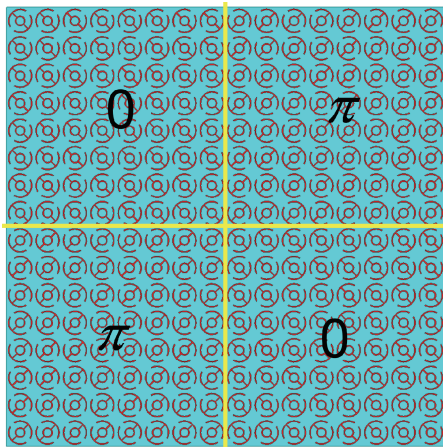


图7 方形棋盘排布结构形式

Fig.7 Square chessboard structures

线,将平面区域分为 4 个子阵,每个子阵的轮廓均为三角形,将超表面和其镜像单元沿子阵分界线交替排布,顶点相对的区域采用相同的单元,边线相邻的区域采用不同的单元。这里选取 16×16 的平面阵列,具体如图 8 所示。整体阵面尺寸为 $118.4\text{mm} \times 118.4\text{mm}$ 。

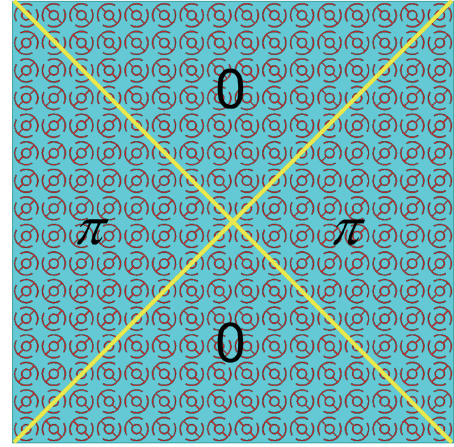


图8 三角棋盘排布结构形式

Fig.8 Triangle chessboard structures

3 性能验证与对比

对设计的方形棋盘式和三角棋盘式超表面阵列结构进行 RCS 仿真计算,同时以同尺寸金属平板作为对比对象,观察 RCS 减缩效果。仿真入射平面波频率范围为 $6.5 \sim 20\text{GHz}$,入射角为 0° (垂直超表面法向),极化状态包含 x 极化与 y 极化。图 9 和图 10 分别列出了 x 极化与 y 极化下金属平板、方形棋盘式和三角棋盘式排布的单站 RCS 曲线,可以看到,设计的两种棋盘结构在 x 极化和 y 极化电磁波入射下各频点 RCS 数值非常接近,具有极化不敏感的特性,两种棋盘结构相较于金属平板在频带内均获得了较大的 RCS 减缩。

图 11 所示为 RCS 缩减值曲线对比。由图 11 可以发现,三角棋盘式的 RCS 减缩效果整体优于方形棋盘式,三角棋盘式在 9.25GHz 实现了最大 36dB 的 RCS 减缩,在 $6.5 \sim 20\text{GHz}$ 范围内 RCS 减缩均值达到了 12.2dB 以上;方形棋盘式在 15.55GHz 实现了最大 22dB 的 RCS 减缩,在 $6.5 \sim 20\text{GHz}$ 范围内 RCS 减缩均值达到了 11.7dB 以上。两种棋盘式结构在宽带内的 RCS 缩减值统计见表 1。

4 结论

本文提出的极化转换超表面在 X 和 Ku 波段均实现了

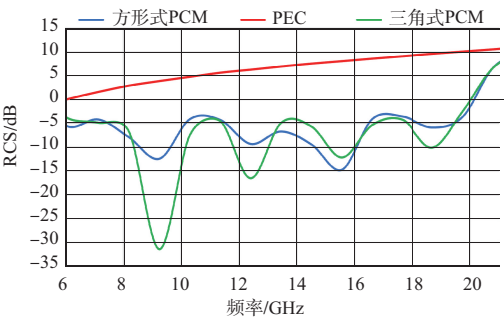


图9 x极化RCS对比曲线

Fig.9 Comparison between different structures RCS for x-polarized incidence

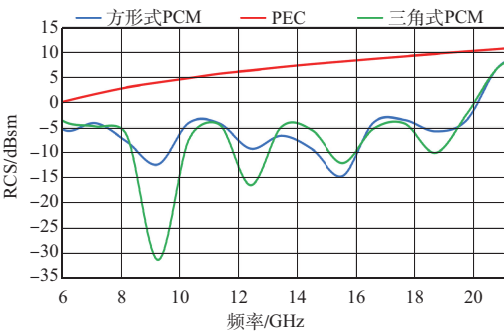


图10 y极化RCS对比曲线

Fig.10 Comparison between different structures RCS for y-polarized incidence

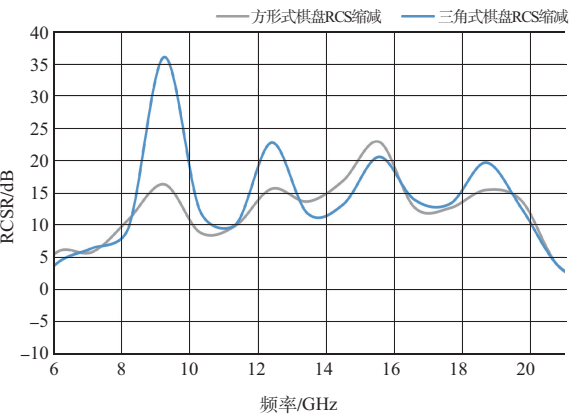


图11 两种棋盘结构减缩值对比

Fig.11 Comparison between RCS reduction for chessboardz structure

表1 棋盘结构RCS缩减值统计

Table 1 RCS reduction statistics for chessboard structures

类型	方形 棋盘 x极化	三角 棋盘 x极化	方形 棋盘 y极化	三角 棋盘 y极化
RCS缩减峰值/dB	22.91	36.07	22.83	35.29
RCS缩减均值/dB	11.73	12.23	11.72	12.25

较高的极化转换效率,在8~20GHz频率范围内具有90%以上的极化转换效率,在6.5~8GHz频率范围内具有85%的极化转换效率,PCR大于90%的相对带宽为85%,PCR大于85%的相对带宽为101%,并利用单元自身和其镜像单元组成方形、三角式棋盘阵列结构,实现了在6.5~20GHz频率范围内宽带RCS缩减,缩减均值达到了11dB以上,单元自身和设计的棋盘式阵列均具有极化不敏感的特性,能够应用于多极化状态的宽带RCS缩减场景。

AST

参考文献

[1] 姚旭,曹祥玉,高军,等.一种极化选择多频带的低雷达截面
积反射屏[J].西安电子科技大学学报,2014,41(1):153-157.
Yao Xu, Cao Xiangyu, Gao Jun, et al. Polarization-dependent
mutiband low RCS reflection screen[J]. Journal of Xidian
University, 2014, 41(1):153-157. (in Chinese)

[2] 郑月军,高军,曹祥玉,等.覆盖X和Ku波段的低雷达散射截面
人工磁导体反射屏[J].物理学报,2015,64(2):250-256.
Zheng Yuejun, Gao Jun, Cao Xiangyu, et al. A low radar cross-
section artificial magnetic conductor reflection screen covering
X and Ku band[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(2): 250-256.
(in Chinese)

[3] 任高飞,徐勤.基于人工磁导体的低RCS微带天线设计[J].太
赫兹科学与电子信息学报,2022,20(9):959-964.
Ren Gaofei, Xu Qin. Design of low RCS microstrip antenna
based on artificial conductor[J]. Journal of Terahertz Science
and Electronic Information Technology, 2022, 20(9): 959-964.
(in Chinese)

[4] 张小娟,胡欣宇,岳亚伟,等.人工磁导体吸波体设计及其应
用[J].科学技术与工程,2017,17(16):201-205.
Zhang Xiaojuan, Hu Xinyu, Yue Yawei, et al. Artificial magnet-
ic conductor absorber and applications[J]. Science Technology
and Engineering, 2017, 17(16):201-205. (in Chinese)

[5] 王成,王星,李思佳,等.基于双层介电AMC的宽带隐身超表
面[J].现代雷达,2021,43(4):52-58.
Wang Cheng, Wang Xing, Li Sijia, et al. A stealth metasurface
with wide band based on double layer dielectric AMC[J].
Modern Radar, 2021, 43(4):52-58. (in Chinese)

[6] Gao Xi, Han Xu, Cao Weiping, et al. Ultrawideband and high-
efficiency linear polarization converter based on double V-
shaped metasurface[J]. IEEE Transactions on Antennas and

- Propagation, 2015, 63(8):3522-3530.
- [7] Liu Ying, Jia Yongtao, Zhang Wenbo, et al. Wideband RCS reduction of a slot array antenna using a hybrid metasurface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(5): 3644-3652.
- [8] 潘晨清, 周东方, 刘起坤, 等. 基于极化转换超表面的宽带低雷达散射截面缝隙天线阵[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(10): 36-42.
- Pan Chenqing, Zhou Dongfang, Liu Qikun, et al. Slot antenna array with broadband low radar cross section using polarization conversion metasurface[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(10):36-42. (in Chinese)
- [9] 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.
- Wang Zhu, Luo Yan, Kou Jiaqi, et al. Design of broadband high-efficiency linear polarization converter based on metasurface[J]. Electronic Components and Materials, 2021, 40(2):163-167+178. (in Chinese)
- [10] Ibrahim M S, Mahmoud A, Awamry A, et al. Wideband anisotropic unit cell design for perfect cross-polarization conversion[C]. 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. IEEE, 2019.
- [11] 付长风, 董少华, 韩连福. 基于超表面的高效宽带双极化转换器设计[J]. 光电子·激光, 2022, 33(7):686-693.
- Fu Changfeng, Dong Shaohua, Han Lianfu. Design of high-efficiency broadband dual-polarization converter based on metasurface[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2022, 33(7): 686-693. (in Chinese)

Design of Broadband Polarization Conversion Metasurface for X and Ku Bands and RCS Reduction Applications

Zhao Yitong, Wang Ganglin, Tang Xingzhong, Li Yan

Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100029, China

Abstract: For anti-detection of high-resolution radar and electromagnetic stealth issues, a broadband reflective polarization conversion metasurface is designed for X and Ku bands, which can achieve more than 85% polarization conversion efficiency in the range of 6.5~8GHz and more than 90% polarization conversion efficiency in the range of 8~20GHz, and the relative bandwidth of polarization conversion efficiency above 85% is 101%, and the thickness of metasurface structure is less than 3.6mm. Square and triangle chessboard structures are designed based on this metasurface, the radar scattering cross section of both chessboard structures has been greatly reduced under vertical incidence of x -polarized and y -polarized electromagnetic waves compared with the same size metal. Both have polarization insensitive characteristics, in which the maximum RCS reduction of square chessboard structure reaches 22.91dB, and the average RCS reduction of square chessboard structure reaches 11.73dB. The maximum RCS reduction of triangle chessboard structure reaches 36.07dB, and the average RCS reduction of triangle chessboard structure reaches 12.29dB, playing a significant role in reducing the single station RCS and improving electromagnetic stealth performance.

Key Words: polarization conversion metasurface; RCS; polarization conversion ratio; artificial magnetic conductor; chessboard structures