



transmission window

随着现代战争和技术的发展,隐身技术成为了武器装备发展的必然趋势,特别是航空装备。所谓“隐身技术”,也被称为“目标特征信号控制”或“低可探测技术”,其根本目的就在于降低自身被探测的概率、缩短被探测的距离,提高生存能力,提升作战效能<sup>[1]</sup>。传统上,缩减雷达散射截面(RCS)的方法有两种<sup>[2-3]</sup>:其一是外形隐身技术,通过外形设计调控散射波的方向,使其远离雷达的接收方向,外形隐身技术一直以来都是隐身技术的首选途径<sup>[4]</sup>。其二是材料隐身技术,通过加载吸波材料,将电磁波转化为热能,降低 RCS<sup>[5]</sup>。大量的吸收材料包括复合材料<sup>[6]</sup>,加载集总元件<sup>[7]</sup>,和吸波超材料<sup>[8]</sup>等,已经被设计、制作和测试,实现了多频带、宽频带的电磁吸收。通过上述方法,已经可以有效降低自身 RCS。随着超表面(被视为“二维”超材料)的深入研究,其在隐身、天线中的应用不断深化,提升天线的性能,包括低散射、高增益等<sup>[9-10]</sup>。散射相消是降低目标 RCS 的另一种有效方法,利用超表面实现对消近年来受到人们的重视。为了减小目标后向 RCS,文献[11]提出了由理想导体(PEC)和人工磁导体(AMC)(两者反射相位存在  $\pi$  的相差)组成的棋盘超表面。然而,这种超表面通常表现出窄带性能。为了扩大 RCS 缩减的带宽,采用 2 个或 2 个以上的谐振元件构建了超表面<sup>[12-13]</sup>。此外,还报道了吸收和散射相消相结合的机理,以实现宽带 RCS 的降低<sup>[14]</sup>。

在综合外形设计和涂覆隐身材料之后,飞行器等平台具有很好的隐身性能,但是各类通信、探测系统的电磁孔径已然成为隐身平台的主要电磁散射贡献者之一。特别地,由于增益高、方向性强、易于波束调控与赋形,大口径阵列天线已经逐步应用,一方面提升飞行器作战效能,但是另一方面也使其成为了更强的散射源。若对这些天线孔径不采取有效的隐身手段,将会严重影响飞行器的整体隐身性能。如何能够在保证天线辐射性能的同时,提升天线的隐身性能成为了研究的重点和难点<sup>[15-16]</sup>。

针对天线罩期望能在宽带低 RCS 特性的基础上,引入透波窗口,同时满足天线的隐射性能和辐射性能的现实需求,文献[17]提出了吸收-散射频率选择天线罩设计。通过复合集总元件和带通型频率选择表面实现了“吸收-透射-散射”;文献[18]提出了由多层金属结构组成的各向异性的单元结构,实现了“散射-透射-散射”的电磁功能超表面。本文提出了极化旋转超表面复合带通频率选择表面的新型超表面设计。通过调节极化旋转介质响应厚度,

实现兼具同极化透波“窗口”和双带交叉极化反射的超表面设计。然后利用几何相位仅对交叉极化波有响应的特点,实现透波“窗口”外的低散射特性。

## 1 设计原理

相位调节方式包括传输相位、谐振相位等。2014 年,研究人员开发了几何相位概念,研究了极化旋转单元与旋转角度的关系。当元原子绕其中心旋转  $\theta$  时,相位差为  $2\theta$ 。为了进一步分析几何相位,采用偶极子模型进行分析。通常入射到偶极上的电磁波束会引起电偶极子动量,电偶极子动量可以表示为<sup>[19-20]</sup>:

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \end{bmatrix} = \alpha_e \begin{bmatrix} \cos^2(\theta) & \\ \cos(\theta)\sin(\theta) & \cos(\theta)\sin(\theta) \\ \sin^2(\theta) & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $P_x$ 、 $P_y$ 为电偶极子动量; $\alpha_e$ 为电极化率。若电磁波为圆极化,则沿  $x$  方向和  $y$  方向的电场分别有分量  $E_x$  和  $E_y$ 。根据电磁场理论, $P_{L(R)}$  和  $P_x$ 、 $P_y$  有如下关系:

$$P_{L(R)} = P_x \pm jP_y \quad (2)$$

$E_{L(R)}$  与  $E_x$  和  $E_y$  的关系式为:

$$E_{L(R)} = E_x \pm jE_y \quad (3)$$

式中: $L(+)$ 和  $R(-)$ 分别代表左、右旋极化。根据式(1)和式(2),可以得到:

$$P_{L(R)} = \frac{1}{2}\alpha_e(E_x \pm jE_y) \pm \frac{1}{2}\alpha_e e^{\pm j2\theta}(E_x \pm jE_y) = \frac{1}{2}\alpha_e E_{L(R)} \pm \frac{1}{2}\alpha_e e^{\pm j2\theta} E_{R(L)} \quad (4)$$

由式(4)可知,当电磁波入射时,反射(透射)波会包含 2 个分量,即同极化波和交叉极化波。只有在交叉极化波下,当单元绕中心旋转时,才会发生相移。此外,旋转角度可以从 0 调整到  $\pi$ ,从而产生覆盖  $2\pi$  的相移;而对于同极化反射/透射波,则旋转单元不会产生相移。利用这一性质,可以通过设计极化旋转单元的极化特性,在低频和低频表现为反射型极化旋转表面,而在中间频带,则表现为透波表面。然后分别独立调控同极化和交叉极化波的相位分布,得到带有同极化透波窗口的低 RCS 超表面。

## 2 超表面设计与仿真

### 2.1 单元设计

极化旋转超表面的研究已经日趋成熟,在研究中不难发现,极化旋转效率和频带带宽与结构单元

的响应厚度息息相关,也就是说,尽管采用同一结构单元,但是不同的响应厚度,会使得极化旋转效率和频带千差万别。如图1所示,采用“双箭头”结构作为基础单元<sup>[21]</sup>,金属结构刻蚀在0.1 mm的FR4介质( $\epsilon_r=4.3, \tan \delta=0.025$ ),金属线宽0.1 mm。下层结构为硬质泡沫( $\epsilon_r=1.1$ )厚度记为 $d_f$ ,其他参数: $p=10$  mm, $l=4.3$  mm, $c=1.3$  mm。通过改变 $h_1$ ,仿真不同厚度对于极化旋转性能的影响,其同极化反射率结果如图2所示,可以看出,当 $h_1=5$  mm时,在12~18 GHz能够实现高效的极化旋转。随着 $h_1$ 的增加,极化旋转频带向低频移动。当 $h_1=10$  mm时,高效的极化旋转发生在4.5~8.8 GHz。上述结果说明:通过调节极化旋转单元的响应厚度,能够调节极化旋转效率和频带。

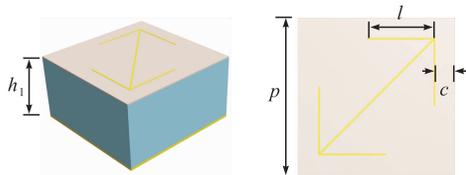


图1 单元结构示意图

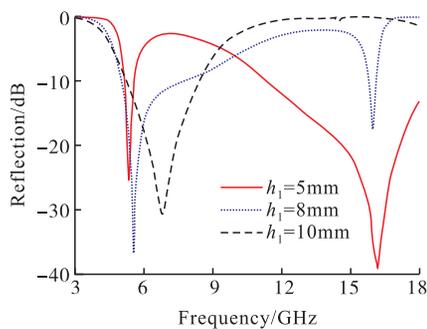


图2 不同厚度下的同极化反射率对比

结合上述介质响应厚度对极化旋转性能的影响,文中提出引入带通型频率选择表面替换传统的金属反射背板,期望通过频率选择表面的带通特性,实现对极化旋转超表面响应厚度的调节,进而实现兼具透波窗口和交叉极化反射性能的超表面,具体架构如图3所示。上层为“双箭头”极化旋转超表面,下层为带通型频率选择表面,中间层为硬质泡沫。其中频率选择表面结构由网格和十字型金属结构组成,并刻蚀在厚度为 $h_2$ 的F4B介质( $\epsilon_r=2.65, \tan \delta=0.001$ )基板上。

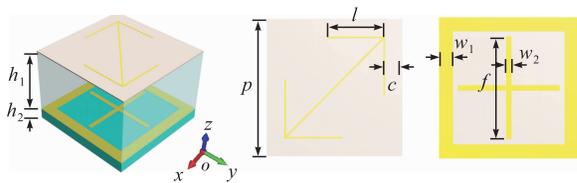


图3 结构示意图

## 2.2 单元反射透射性能仿真

为了得到理想的反射/透射性能,利用 CST 电磁仿真软件的优化算法对单元结构的几何参数进行

优化设计,由于优化算法并不是本文工作的研究重点,在这里不再赘述。经过优化,得到结构几何参数结果如下: $p=10$  mm, $l=4.3$  mm, $c=1.3$  mm, $w_1=1$  mm, $f=7.3$  mm, $w_2=0.4$  mm。作为本设计最重要的参数,以 $x$ 极化波作为入射波,仿真不同 $h_1$ 和 $h_2$ 下的同极化反射 $r_{xx}$ /透射 $t_{xx}$ 和交叉极化反射 $r_{yx}$ /透射 $t_{yx}$ 。仿真结果如图4~5所示。可以看出,单元的反透射性能受 $h_1$ 影响较大,这与理论分析相符合,极化旋转单元的性能受到响应厚度的影响。而 $h_2$ 则对单元的反透射性能影响很小,这主要是因为 $h_2$ 为下层频率选择表面的介质厚度,对其透波性能并不产生影响。根据仿真结果,最终选择 $h_1=6$  mm, $h_2=1.5$  mm。单元最终性能为在5.0~7.0 GHz和12.5~17.5 GHz频带内可实现高效的交叉极化反射。同时,在10.0~11.0 GHz频带内实现了高效的同极化透射,插损低于1 dB,达到0.8 dB,达到设计目的。

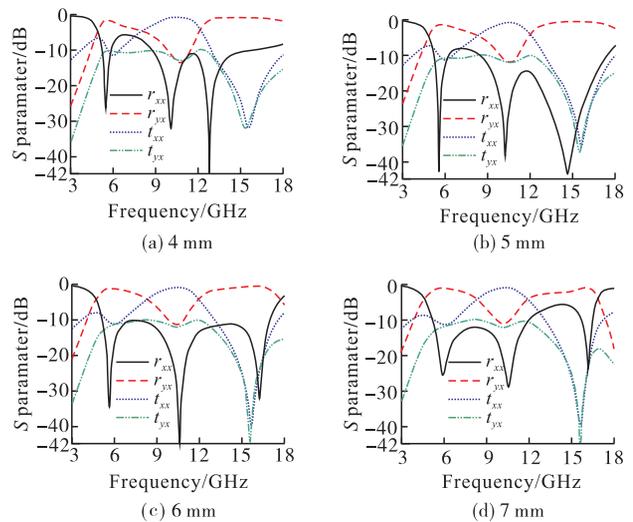


图4 不同 $h_1$ 下的反射/透射对比

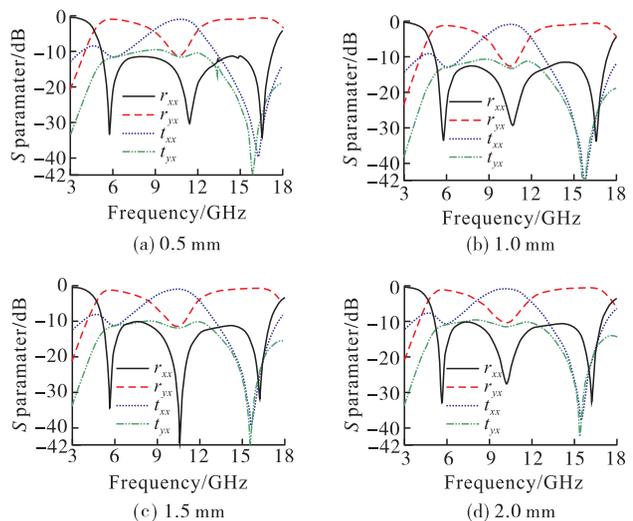


图5 不同 $h_2$ 下的反射/透射对比

根据几何相位特性,通过旋转单元特性,可以调控交叉极化波相位而不影响同极化波。由于交叉极化透

射波和同极化反射波在宽带范围内幅值均低于  $-10$  dB,因此,只给出旋转前后交叉极化反射波和同极化透射波的幅值和相位差,如图 6 所示。可以看出,旋转前后的交叉极化反射波的相位差为  $180^\circ$ ,而幅值不变;同极化透射波的幅值相位均不变化。黄色区域为极化旋转频带,蓝灰色区域则是同极化透波窗口。

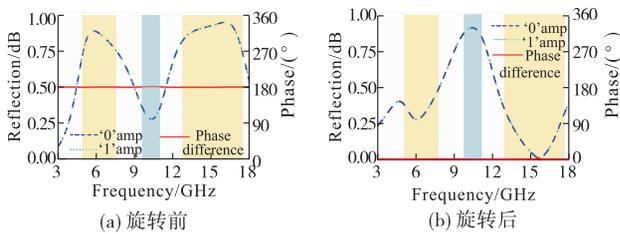


图 6 极化旋转单元旋转前后的幅值相位对比

### 2.3 棋盘超表面设计

棋盘结构缩减 RCS 是基于干涉相消原理实现的。通过设计棋盘表面单元的反射相位,调控反射波偏离原来的入射方向,缩减后向 RCS。最初棋盘结构实现缩减 RCS 是利用完美电导体(perfect electronic conductivity, PEC)和人工磁导体(artificial magnetic conductor, AMC)<sup>[9]</sup>,当电磁波入射到 PEC 单元表面时,反射波相对入射波有  $180^\circ$ 的相位差;而入射到 AMC 单元时,反射波相对入射波则无相位差,即 2 种单元的反射波存在着  $180^\circ$ 的相位差,将两种单元排布成棋盘结构,棋盘结构中的每一“格”包含若干个 PEC 或者 AMC 单元,利用单元间的  $\pi$ 的相位差,调控反射波远离入射方向,实现后向 RCS 缩减。

将构成棋盘结构的相位响应不同的区域分别定义为“0”和“1”,当波长为  $\lambda$ 的电磁波垂直入射到棋盘超表面时,其 RCS 可以表示为<sup>[22-23]</sup>:

$$RCS = 10 \log \left( \frac{4\pi}{\lambda^2} \right) |S_1 A_1 + S_0 A_0 e^{j\Delta\varphi}| \quad (5)$$

式中: $S_0$ 和  $S_1$ 分别为“0”和“1”区域的面积大小; $A_0$ 和  $A_1$ 分别为不同区域的反射幅值; $\Delta\varphi = \varphi_0 - \varphi_1$ ,是“0”和“1”区域的反射相位差。通过与等大的金属板的 RCS 相比,可以得到棋盘超表面的 RCS 缩减值为<sup>[22-23]</sup>:

$$R - RCS = 10 \log | (1-f)A_1 + fA_0 e^{j\Delta\varphi} | \quad (6)$$

式中: $f = S_0 / (S_0 + S_1)$ 是“0”区域的占比。根据式(6),可以看出通过调节  $f$ 、“0”和“1”区域的反射幅值和反射相位差,就能实现相应的 RCS 缩减,特别地,当  $\Delta\varphi = 180^\circ$ 、 $fA_0 = (1-f)A_1$ 时,RCS 缩减达到最大。相位差与 RCS 缩减值之间的关系为<sup>[23]</sup>:

$$\cos(\Delta\varphi) \leq \frac{|p|^2 - f^2 A_0^2 - (1-f)^2 A_1^2}{2f(1-f)A_0 A_1} \quad (7)$$

根据以上棋盘结构设计分析原理,利用 2.1 节中的超表面单元结构,通过旋转上层极化旋转表面得到几何相位对单元进行排布,可得到棋盘超表面。利用电磁仿真软件仿真在平面波入射下的远场散射性能。为了方便说明,选取 5.5 GHz 和 15.0 GHz 2

个频点代表 2 个极化旋转频带(5.0~7.0 GHz 和 12.5~17.5 GHz 频带内)作进一步说明,结果如图 7 所示。可以看出,当平面波入射后,超表面将平面波散射为 4 个波束,且均偏离法向方向,使得法向回波能量得到降低,进而实现 RCS 缩减。

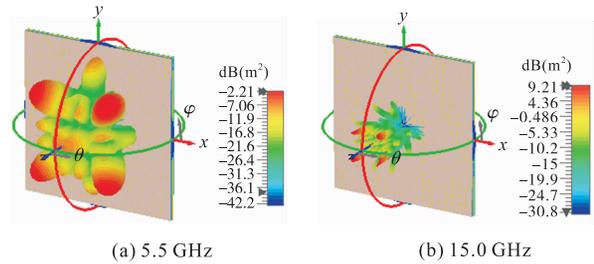


图 7 远场散射性能

## 3 结果与讨论

根据前文的棋盘结构的设计原理,以 2.3 节设计的棋盘式超表面为模型加工样品。样品为 3 层结构通过粘接组成,上层为极化旋转结构层,第 2 层为硬质泡沫,第 3 层为频率选择表面层,整体尺寸为  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。在暗室内,对样品的散射性能进行测试。最后利用标准增益喇叭在加载设计的天线罩的前后性能对比,进一步评估其透射性能以及在天线中的应用前景。

### 3.1 散射性能测试

在微波暗室中对棋盘超表面的法向反射、透射性能进行测试。当反射率和透射率均较低时,才能准确地说明法向的散射得到有效抑制。图 8 为暗室测试反射、透射的实验状态和测试结果。

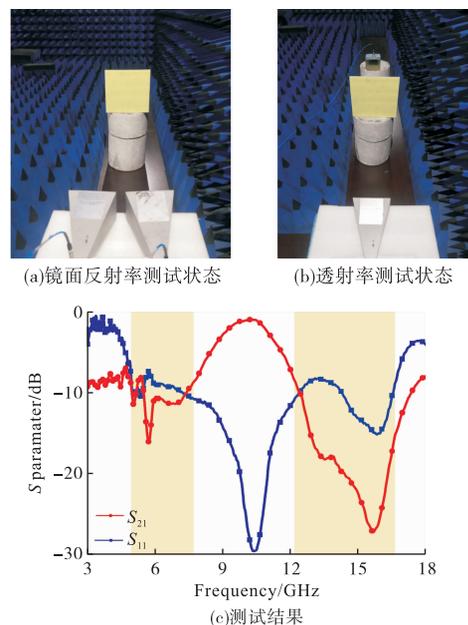


图 8 实验状态图

当接收发射喇叭天线在样品一侧时,测试样品的镜面反射率  $S_{11}$ ,当接收发射喇叭天线在样品两侧

时,测试样品的透射率  $S_{21}$ 。从图 8(c)的测试结果可以看出,在 10.5 GHz 处具有高效的透射,而在两侧频段,反射率和透射率均较低(接近 -10 dB),这是因为在 5.0~7.0 GHz 和 12.5~17.5 GHz 频带内,超表面将电磁波散射到其他方向,法向的反射和透射幅值降低。证明了在两侧频段的法向 RCS 得到降低,达到了预期目的。

### 3.2 透射性能测试

为了进一步验证设计的超表面的透射性能以及在天线罩中的应用潜能,在微波暗室中,利用标准增益喇叭天线测试加载超表面前后的辐射方向图变化对比,具体状态如图 9 所示,其中超表面被放置在发射天线前 20 cm 的位置上。图 10 为 10 GHz、10.5 GHz 和 11 GHz 的辐射方向图测试对比,可以看出:基本保证方向图的一致性,其中 10.5 GHz 增益损失 0.9 dB,10 GHz 和 11 GHz 损失接近 1.3 dB。这主要是超表面的固有插损以及交叉极化透射波散射造成的。此外值得注意的是,由于超表面单元旋转前后对于同极化透射波无相位响应,因此棋盘排布基本不影响辐射性能。

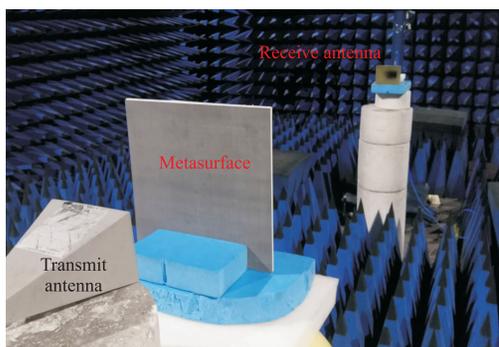


图 9 透射性能测试

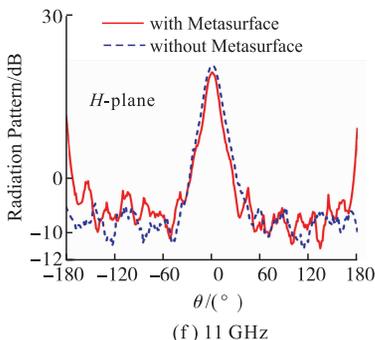
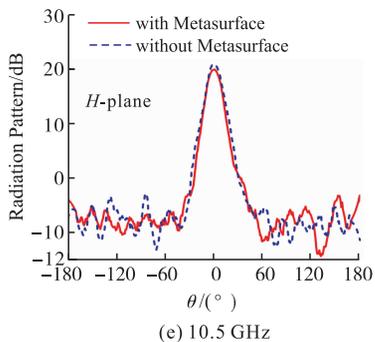
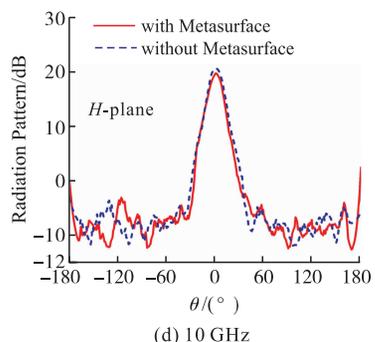
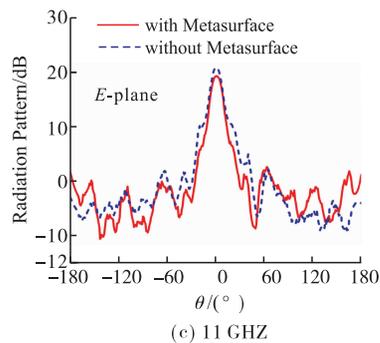
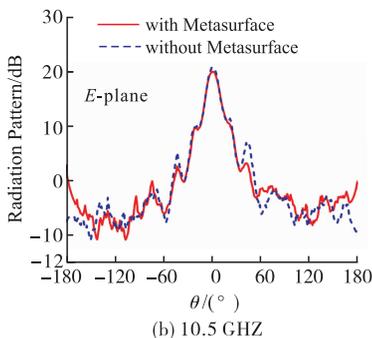
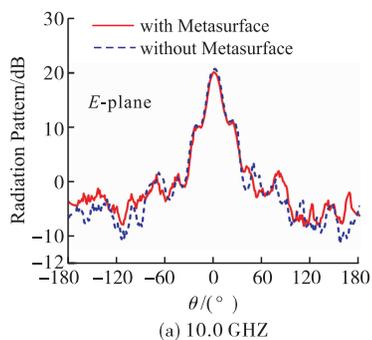


图 10 加载超表面前后辐射方向图对比

## 4 结语

本文提出了一种带有透波窗口的双带 RCS 缩减超表面。为了实现这一目标,首先分析了几何相位的特性以及介质响应厚度对于极化旋转特性的影响。然后基于分析结果,提出了极化旋转结构复合频率选择表面的复合设计架构,通过带通型频率选择表面的通-阻特性调节极化旋转单元的响应厚度,分别在低频和高频实现了交叉极化反射,特别地,在中间频带引入透波特性,并对超表面的镜面反射率

和传输性能进行了测试。仿真和实测结果表明,所设计的超表面均表现出带通特性,同时可在传输窗口外实现宽带低散射特性,并利用标准喇叭天线,对比加载设计的超表面结构前后远场辐射性能,进一步研究了其传输特性。但是在仿真实验中同样发现设计的多层结构造成带内插损较大,达到 1.3 dB,对辐射性能有一定影响,在今后的设计中可以采用低介电常数介质,降低结构金属占比以降低谐振等的方式来降低插损。本文的研究结果提出了一种散射—透波—散射超表面设计与架构,在隐身天线罩中具有潜在的应用价值。后期针对不同频带的相位、幅值独立调控开展研究,进一步提升其实用价值。

### 参考文献

- [1] 桑建华. 飞行器隐身技术 [M]. 北京:航空工业出版社,2013.
- [2] 丁鹭飞. 雷达原理[M]. 3版. 西安:西安电子科技大学出版社,2002.
- [3] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术 [M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [4] KNOTT E F, SHAEFFER J F, TULEY M T. Radar Cross Section [M]. Raleigh, NC: Scitech Publishing Inc, 1993.
- [5] 王彪. 超材料隐身理论应用于多物理场的研究进展 [J]. 中国材料进展, 2019, 38(1): 30-41.
- [6] ZHANG K L, ZHANG J Y, HOU Z L, et al. Multifunctional Broadband Microwave Absorption of Flexible Graphene Composites [J]. Carbon, 2019, 141: 608-617.
- [7] ZHANG B C, JIN C, SHEN Z X. Low-Profile Broadband Absorber Based on Multimode Resistor-Embedded Metallic Strips [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 68(3): 835-843.
- [8] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, et al. Perfect Metamaterial Absorber [J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.
- [9] 陈志宁, 刘炜, 李腾, 等. 惠更斯电磁超构表面微波天线的研究进展(特邀文章) [J]. 电波科学学报, 2018, 33(3): 239-255.
- [10] 林权纬, 黄衡. 一种基于超表面的低剖面宽带透镜天线 [J]. 电波科学学报, 2018, 33(4): 397-403.
- [11] PAQUAY M, IRIARTE J C, EDERRA I, et al. Thin AMC Structure for Radar Cross-Section Reduction [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2007, 55(12): 3630-3638.
- [12] CHEN W, BALANIS C A, BIRTCHEER C R. Dual Wide-Band Checkerboard Surfaces for Radar Cross Section Reduction [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2016, 64(9): 4133-4138.
- [13] CHEN W, BALANIS C A, BIRTCHEER C R. Checkerboard EBG Surfaces for Wideband Radar Cross Section Reduction [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2015, 63(6): 2636-2645.
- [14] WANG Z, FU X, WANG J, et al. Multi-Octave Radar Cross Section Reduction Via Integrated Dispersion Engineering of Polarization-Conversion Metasurface and Metamaterial Absorber [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 53(3): 03LT01.
- [15] 庄亚强, 王光明, 张青峰. 基于组合梯度超表面的低 RCS 微带天线设计 [J]. 电波科学学报, 2018, 33(4): 441-446.
- [16] 刘英, 李娜, 贾永涛, 等. 基于相位梯度表面的缝隙阵列天线宽带 RCS 减缩 [J]. 电波科学学报, 2018, 33(3): 330-336.
- [17] LV Q H, JIN C, ZHANG B C, et al. Hybrid Absorptive-Diffusive Frequency Selective Radome [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(6): 3312-3321.
- [18] PANG Y Q, LI Y F, QU B Y, et al. Wideband RCS Reduction Metasurface with a Transmission Window [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(10): 7079-7087.
- [19] DING X, MONTICONE F, ZHANG K, et al. Ultrathin Pancharatnam-Berry Metasurface with Maximal Cross-Polarization Efficiency [J]. Advanced Materials, 2015, 27(7): 1195-1200.
- [20] CHEN X, HUANG L, MÜHLENBERND H, et al. Dual-polarity Plasmonic Metalens for Visible Light [J]. Nature Communications, 2012, 3: 1198.
- [21] CHEN H Y, WANG J F, HUA M, et al. Ultra-Wideband Polarization Conversion Metasurfaces Based on Multiple Plasmon Resonances [J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(15): 154504.
- [22] HOU Y C, LIAO W J, TSAI C C, et al. Planar Multi-Layer Structure for Broadband Broad-Angle RCS Reduction [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2016, 64(5): 1859-67.
- [23] PANG Y Q, LI Y F, WANG J F, et al. Carbon Fiber Assisted Glass Fabric Composite Materials for Broadband Radar Cross Section Reduction [J]. Composites Science & Technology, 2018, 158: 19-25.

(编辑:徐楠楠)