

文章编号: 2095-4980(2025)06-0597-07

## 基于 Voronoi 图结构的透明超表面 RCS 缩减技术

刘润生<sup>1,2a,2b,2c,3</sup>, 祁峰<sup>\*1,2a,2b,2c,3</sup>, 汪业龙<sup>2a,2b,2c,3</sup>, 王安宁<sup>2a,2b,2c,3,4</sup>

(1. 沈阳航空航天大学 电子信息工程学院, 辽宁 沈阳 110136; 2. 中国科学院 a. 沈阳自动化研究所; b. 机器人与智能制造研究院; c. 光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110169; 3. 辽宁省太赫兹成像感知重点实验室, 辽宁 沈阳 110169; 4. 沈阳建筑大学 电气学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘要:** 针对光学仪器窗口的低电磁散射需求, 基于 Voronoi 图的金属微结构模型, 采用棋盘式阵列排布超表面结构, 在满足仪器窗口透明度和成像质量需求的同时, 实现了雷达散射截面(RCS)的有效缩减。实验表明, 未透明化处理的棋盘结构超表面在 11.6~17.9 GHz 频段内可实现超过 10 dB 的 RCS 缩减, 透明化处理前后的超表面单元相位响应保持一致。所设计的透明化 RCS 缩减超表面具有较高的透光率, 可均匀衍射杂散光分布, 且具备宽频带 RCS 缩减的特性。研究结果为低 RCS 透明窗口设计提供了新的思路。

**关键词:** Voronoi 图; 雷达散射截面(RCS); 棋盘结构; 超表面

中图分类号: TN95

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2023324

## RCS reduction technology for transparent metasurfaces based on Voronoi diagram structure

LIU Runsheng<sup>1,2a,2b,2c,3</sup>, QI Feng<sup>\*1,2a,2b,2c,3</sup>, WANG Yelong<sup>2a,2b,2c,3</sup>, WANG Anning<sup>2a,2b,2c,3,4</sup>

(1.School of Electronic and Information Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning 110136, China; 2a.Shenyang Institute of Automation; 2b.The Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing; 2c.The Key Laboratory of Opto-Electronic Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110169, China; 3.The Key Laboratory of Liaoning Province in Terahertz Imaging and Sensing, Shenyang Liaoning 110169, China; 4.School of Electrical and Control Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang Liaoning 110168, China)

**Abstract:** To meet the low electromagnetic scattering requirements of optical instrument windows, a metal microstructure model based on Voronoi diagrams is employed, arranging the metasurface structures in a checkerboard array. This design achieves effective reduction of Radar Cross-Section(RCS) while satisfying the transparency and imaging quality requirements of the instrument windows. Experiments shows that the checkerboard metasurface without transparentizing could achieve more than 10 dB RCS reduction in the frequency band of 11.6~17.9 GHz, and the phase response of the metasurface unit remains consistent before and after transparentizing. The designed transparent RCS-reducing metasurface has high light transmittance, can uniformly diffract stray light distribution, and possesses the characteristic of wideband RCS reduction. The research results provide a new idea for the design of low-RCS transparent windows.

**Keywords:** Voronoi diagram; Radar Cross Section(RCS); chessboard structure; metasurface

收稿日期: 2023-10-16; 修回日期: 2023-12-09

基金项目: 雄安新区科技创新专项(2022XAGG0181); 兴辽英才计划(XLYC2007074); 沈阳市中青年科技创新人才支持计划项目(RC220523); 辽宁省医工交叉联合基金资助项目(2022-YGJC-03)

\*通信作者: 祁峰 email:qifeng@sia.cn

引用格式: 刘润生, 祁峰, 汪业龙, 等. 基于 Voronoi 图结构的透明超表面 RCS 缩减技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(6): 597-603. DOI: 10.11805/TKYDA2023324.

**Citation format:** LIU Runsheng, QI Feng, WANG Yelong, et al. RCS reduction technology for transparent metasurfaces based on Voronoi diagram structure[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(6): 597-603. DOI: 10.11805/TKYDA2023324.

近年来,在航空航天设备的研发领域,对雷达散射截面(RCS)缩减超表面的需求不断增长。传统的RCS缩减超表面透光率低,严重影响了其在光学探测场景的应用。

超表面透明化是指将传统超表面的不透明金属结构替换为透明的微观网栅结构,减少光的遮挡。透明化的超表面不仅保留了超表面的电磁特性,还解决了金属层对光线的阻挡问题,实现了光学与电磁特性的兼容。要实现超表面透明化,必须使超表面的介质层对光波透明;同时,超表面中常用的连续金属薄膜需替换为包含许多透光孔径的金属微结构<sup>[1-4]</sup>。超表面单元透明化前后的反射幅度与反射相位趋于一致<sup>[5-6]</sup>,可见金属微结构替换连续金属薄膜后不易对超表面的电磁性能产生影响。在航空航天装备领域中,光学仪器窗口的电磁散射通常较大,因此将RCS缩减超表面透明化处理,将其用于光学仪器窗口。光学仪器窗口的透明度和成像质量直接影响观测与探测性能,但传统的金属微结构难以兼具高透过率和杂散光分布的均匀性。因此亟需一种新型的金属微结构,使RCS缩减超表面透明化后在保持低电磁散射性能的同时满足光学探测的要求,提高仪器窗口的电磁隐蔽性。

本文提出一种基于Voronoi图<sup>[7]</sup>原理的金属微结构设计方案,此结构具有高透光率,比传统的周期方格形和圆环形微结构杂散光分布更均匀。设计了一种人工磁导体(Artificial Magnetic Conductor, AMC)棋盘结构RCS缩减超表面,将其顶层与底层金属层替换为Voronoi图微结构,形成透明化RCS缩减超表面。该超表面不仅能够缩减RCS,具有高透光率,还能够实现高级次衍射杂散光均匀分布。

## 1 金属微结构设计

### 1.1 微结构建模方法

Voronoi图,又称维诺图或泰森多边形,是由俄国数学家Georgy Fedoseevich Voronoi提出的空间分割算法。 $n$ 个在平面上有区别的种子点,按最近邻原则划分平面,每个点与它的最近邻区域相关联。Delaunay三角形由与相邻Voronoi多边形共享一条边的相关点连接而成,Delaunay三角形的外接圆圆心是与三角形相关的Voronoi多边形的一个顶点。令 $P$ 为多边形的所有种子点集合,对于任意种子点 $P_k \in P$ ,其Voronoi区域是指平面上到 $P_k$ 的距离比 $P$ 中任何其他种子点距离 $d$ 更近的所有点的集合。

对于点集 $\{P_0, P_1, \dots, P_n\}$ 里的种子点 $P_k$ ,其Voronoi区域定义为:

$$R_k = \{x \in X | d(x, P_k) < d(x, P_j), j = \{0, 1, 2, \dots, n\}, j \neq k\} \quad (1)$$

Voronoi图构造原理如图1所示, $A \sim E$ 点为Voronoi图的种子点。虚线表示由这些点构造出的Delaunay三角形,而连接两邻点直线的垂直平分线组成的连续多边形即为Voronoi多边形(粗实线所示)。通过生成均匀分布的散点作为种子点集,即可生成对应的Voronoi图。

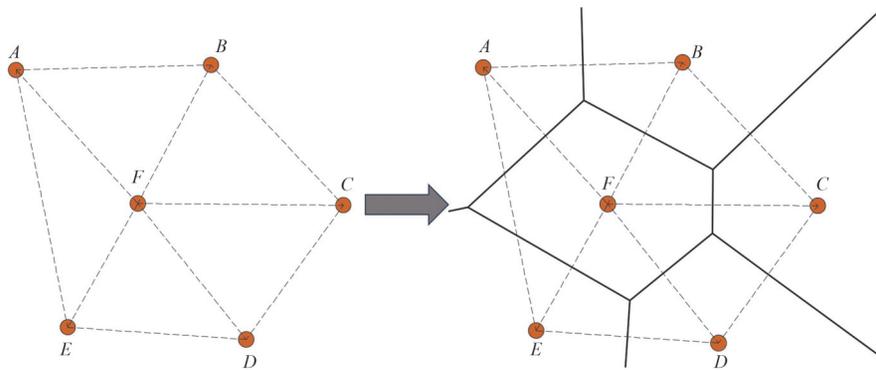


Fig.1 Construction principle of Voronoi diagram  
图1 Voronoi图构造原理

在Matlab中生成等间距的二维点阵,针对矩阵中的每一个点,在 $x$ 方向和 $y$ 方向分别进行位移,位移长度随机生成,确保位移后的散点整体分布均匀,从而生成随机散点阵。然后采用式(1)的思想将这些散点生成1个Voronoi图并返回矩阵 $\mathbf{v}$ 和 $\mathbf{c}$ 。 $\mathbf{v}$ 为Voronoi顶点,每行都包含Voronoi图中一个顶点坐标; $\mathbf{c}$ 的每个元素都包含构成一处Voronoi多边形的所有顶点 $\mathbf{v}$ 的行索引。通过 $\mathbf{v}$ 和 $\mathbf{c}$ 绘制出Voronoi图并填充颜色,最终得到Voronoi图金属微结构模型。

1.2 微结构衍射特性

衍射形成集中分布的杂散光会显著降低成像质量, 仪器的观测和探测效果将受到严重影响。因此, 衍射的杂散光分布的均匀性非常重要。对 Voronoi 图、周期方格形和周期圆环形微结构进行建模, 使它们的金属覆盖面积与网格数量保持一致, 以此对比它们的衍射特性。当波长为  $\lambda$  的单色相干光场照射衍射屏时, 位于衍射屏后距离为  $d$  的观察屏上傍轴区域内的光场分布可由菲涅尔衍射积分公式<sup>[8-9]</sup>给出。

$$U(x,y) = \frac{\exp(jkd)}{jd\lambda} \exp\left[\frac{jk}{2d}(x^2+y^2)\right] \times \mathcal{F}\left\{U_0(x_0,y_0)\exp\left[\frac{jk}{2d}(x_0^2+y_0^2)\right]\right\} \quad (2)$$

式中:  $U_0(x_0,y_0)$  与  $U(x,y)$  分别为衍射屏后表面与观察屏上的光场复振幅;  $k$  为光波数。

设光波波长为 1 000 nm, 衍射距离为 2 000 mm, 仿真衍射光场分布。采用次级大衍射能量与零级光斑能量之比(简称高阶衍射能量占比)评价杂散光分布均匀性, 其值越低, 成像效果越好。另一重要光学特性为透光率, 透光率越高, 光学窗口允许通过的有用信号就越多。根据标量衍射理论, 金属微结构的透光率  $T_{total}$  为:

$$T_{total} = \frac{S_{total} - S_{cover}}{S_{total}} \quad (3)$$

式中:  $S_{cover}$  为金属覆盖面积;  $S_{total}$  为结构总面积。

当金属的覆盖面积一致时, 透光率相同。将微结构建模为二值图像, 金属覆盖处赋值为 0, 透光处赋值为 1, 根据 0 和 1 的分布计算透光率。通过调整 3 种微结构的参数, 使其透光率满足仪器窗口的要求(约 90%), 并观测对应的衍射图像。3 种微结构的示意图及其衍射图如图 2 所示; 3 种微结构的高阶衍射能量占比和透光率如表 1 所示。

从图 2 和表 1 中可见, 周期方格微结构的衍射能量高度集中, 主要沿 4 个方向呈十字型分布, 其高阶衍射能量占比最大(23.74%), 易对零级光斑成像造成干扰。周期圆环微结构的衍射能量分布较均匀, 呈中心对称, 高级次衍射光集中于零级光斑附近, 其高阶衍射能量占比为 20.60%。相比之下, Voronoi 图微结构的衍射能量分布最均匀, 分布方向最多, 其高阶衍射能量占比仅为 1.75%, 显著分散了高级次衍射光斑的能量。上述结果证明, Voronoi 图微结构相比于传统的周期方格形和圆环形微结构, 其杂散光分布最均匀, 显著降低了高阶衍射能量对成像质量的影响。

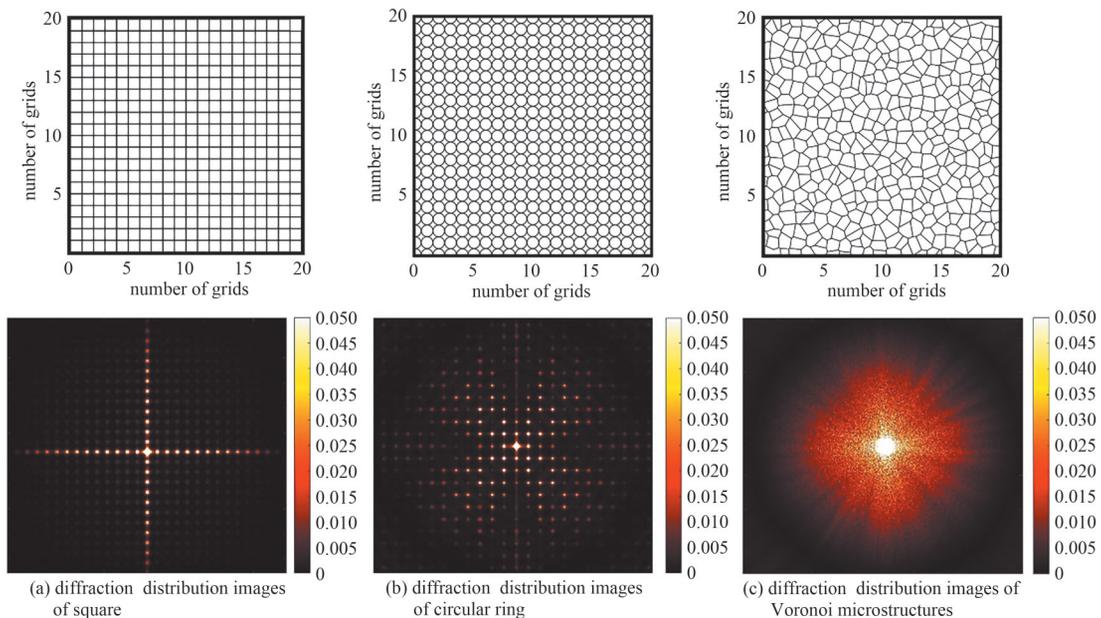


Fig.2 Diffraction distribution images of square, circular ring and Voronoi microstructures

图 2 方格形、圆环形与 Voronoi 图微结构的衍射分布图像

表 1 上述 3 种微结构的高阶衍射能量占比与透光率

Table1 Proportion of high-order diffraction energy and transmittance of the above three microstructures

item	square	circular	Voronoi
transmittance/%	90.25	90.37	90.40
high order diffraction energy proportion/%	23.74	20.60	1.75

## 2 RCS 缩减结构设计

### 2.1 棋盘结构 RCS 缩减原理

传统方法通过将人工磁导体(AMC)表面与理想电导体(Perfect Electric conductor, PEC)平面组合成棋盘式结构,利用二者反射相位差使散射场干涉相消。但 PEC 的反射相位为  $180^\circ$ , 单一 AMC 的反射相位难以在较宽频带内与 PEC 形成足够的反射相位差, 导致 AMC-PEC 结构 RCS 减缩频段较窄, 如图 3(a)所示。为满足宽带 RCS 减缩需求, 采用 2 种 AMC 单元(AMC1 与 AMC2)构建棋盘结构, 如图 3(b)所示, 从而更好地调节相位差<sup>[10]</sup>。根据阵列理论<sup>[11]</sup>, 考虑电磁波垂直入射且发生全反射的条件下, 总反射  $E_r$  与相同面积 PEC 板的反射场  $E_{pec}$  为:

$$E_r = 2A(e^{j\varphi_1} + e^{j\varphi_2}) \quad (4)$$

$$E_{pec} = 4Ae^{j\varphi_3} \quad (5)$$

式中:  $A$  为 AMC 和 PEC 结构的反射系数, 发生全反射时为 1;  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  分别为 AMC1 和 AMC2 的反射相位;  $\varphi_3$  为 PEC 的反射相位。相比于同面积的 PEC 板, 要实现 10 dB 以上的单站 RCS 减缩量(RCS Reduction, RCSR), 应满足<sup>[12]</sup>:

$$R_{RCS} = \frac{|E_r|^2}{|E_{pec}|^2} \leq -10 \text{ dB} \quad (6)$$

联立式(4)~(6)可得

$$143^\circ \leq |\varphi_1 - \varphi_2| \leq 217^\circ \quad (7)$$

满足上述条件时, 2 种 AMC 结构的反射幅度相等且相位差为  $180^\circ \pm 37^\circ$ , 反射方向上的能量被散射到其他方向, 形成多个能量较低的副瓣, 可在正面产生超过 10 dB 的单站 RCS 减缩。

### 2.2 RCS 缩减结构的设计与分析

采用的单元形状为双开口环形, 开口宽度为  $g$ , AMC1 单元开口朝  $y$  轴方向, AMC2 单元开口朝  $x$  轴方向。介质材料选用石英玻璃, 相对介电常数为 4.8, 厚度为 2 mm, 其可见光透过率在 93% 以上。顶层和底层金属为铜。图 4 为 AMC 单元基本结构与排布方式示意图, 白色区域为覆铜区域, 灰色为介质区域。AMC 单元基本结构参数见表 2。

基于 HFSS(High Frequency Structure Simulator)电磁仿真平台, 采用 Floquet 端口与主从边界条件对 AMC1 单元进行周期结构仿真, 分析单元 2 种方向的反射相位差。单元在  $x$  极化和  $y$  极化波下的反射相位曲线及反射相位差如图 5 所示。仿真结果表明, 该单元在 10.9~17.1 GHz 的范围内, 相位差为  $180^\circ \pm 37^\circ$ , 满足式(7)对于 RCS 缩减的要求。

对两种单元结构采用图 4 的棋盘排布方式, 在 HFSS 中建立整体尺寸为  $57.6 \text{ mm} \times 57.6 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的有限周期模型进行电磁仿真。采用完美匹配层(Perfectly Matched Layer, PML)边界条件和平面波激励垂直入射, 仿真结果如图 6 所示。图 6(a)为超表面与同尺寸 PEC 板在相同仿真条件下的单站 RCS 差值曲线, 该排布超表面在约 11.6~17.9 GHz 频带内实现  $\geq 10 \text{ dB}$  以上的缩减, 且在 17.3 GHz 时, RCS 缩减程度最高。该结果与 AMC 单元在  $180^\circ \pm 37^\circ$  相位差所在的频带范围有微小误差, 因为 AMC 单元基于无限大平面进行仿真, 为理想情况。17.3 GHz 时, 超表面与 PEC 板的单站 RCS 二维散射场如图 6(b)所示, 可见中心

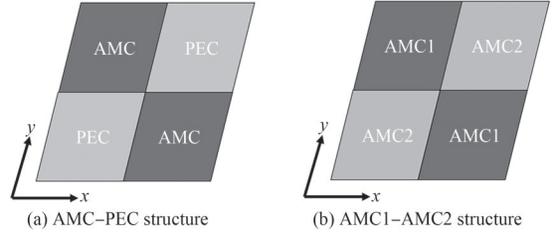


Fig.3 Chessboard style RCS reduction structure  
图3 棋盘式 RCS 缩减结构

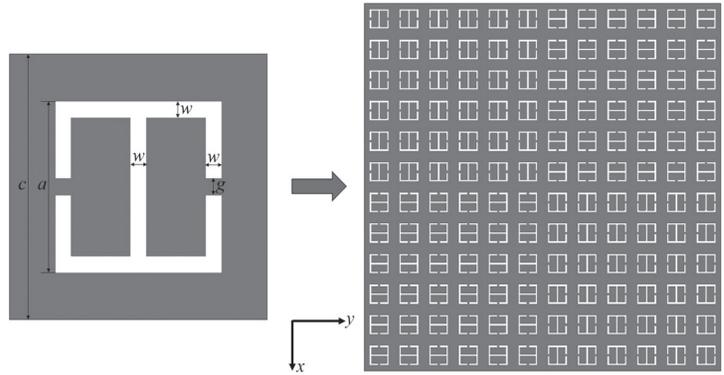


Fig.4 Basic structure and layout of AMC units  
图4 AMC 单元基本结构与排布方式

表 2 AMC 单元基本结构参数(单位:mm)

parameter	$a$	$w$	$g$	$c$
value	3.1	0.3	0.3	4.8

方向的 RCS 被极大地抑制, 其缩减量可达 27 dB 以上。图 7 为 PEC 板和超表面在 17.3 GHz 时的 3D 散射方向图, 图 7(a) 为 PEC 板散射方向图, 图 7(b) 为 RCS 缩减超表面散射方向图, 可以看出原先集中在垂直方向上的主瓣能量显著降低, 主要被散射到其他 4 个方向, 由此可见该结构对于 RCS 缩减具有显著效果。

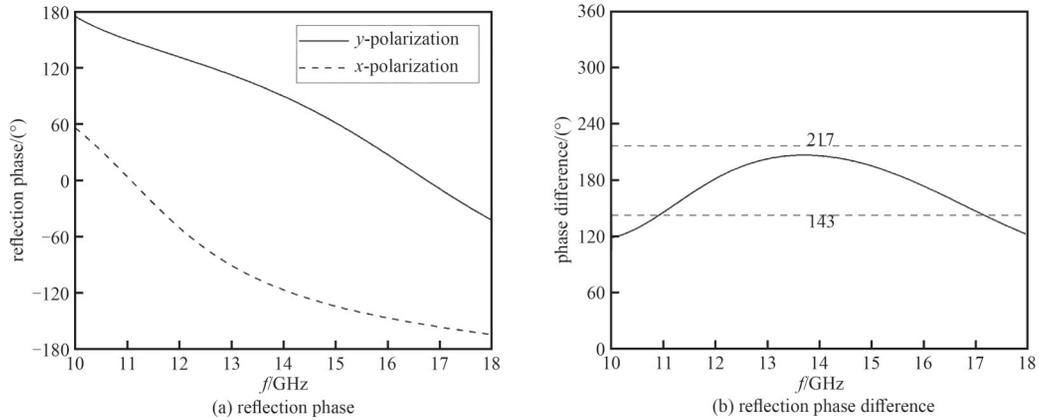


Fig.5 Reflection phase and reflection phase difference of the AMC unit at x-polarization and y-polarization

图 5 AMC 单元在 x 极化和 y 极化下的反射相位及反射相位差

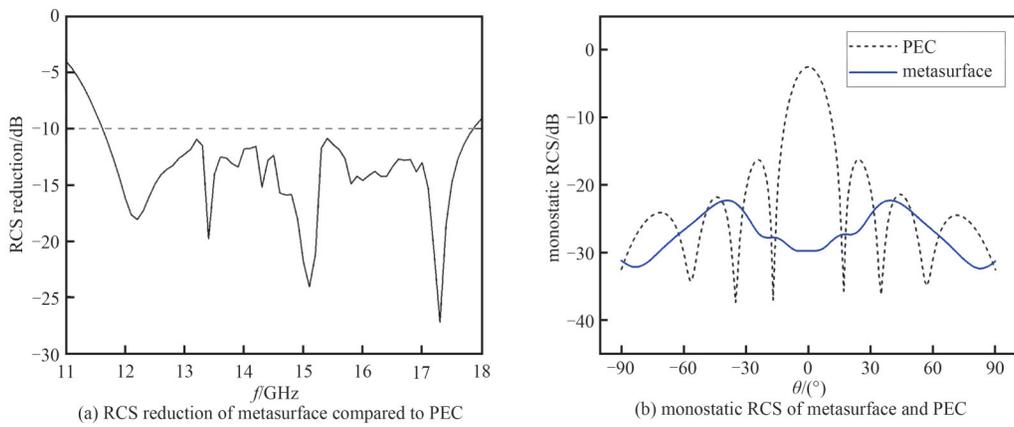


Fig.6 Metasurface RCS reduction performance

图 6 超表面 RCS 缩减性能曲线图

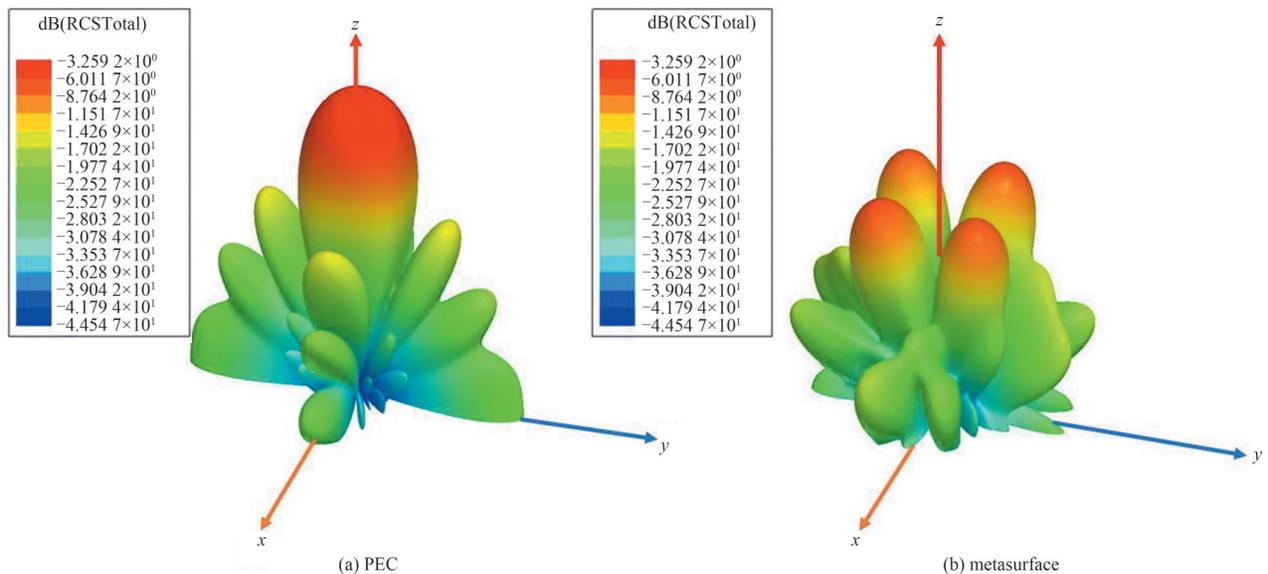


Fig.7 3D scattering pattern of PEC board and metasurface at 17.3 GHz

图 7 PEC 板和超表面在 17.3 GHz 时的 3D 散射方向图

### 3 RCS 缩减结构透明化

采用 Voronoi 图金属微结构代替超表面单元的表层和底层 PEC 材料, 其网格平均尺寸为 0.3 mm, 金属线宽为 10.5  $\mu\text{m}$ 。棋盘单元的透明化处理示意图如图 8 所示, 左列为原始单元, 右列为结合 Voronoi 图微结构透明化后的单元, 微结构的透光率为 90.65%, 中间层采用透明石英玻璃作为介质材料。

AMC 单元透明化后的反射相位仿真结果如图 9 所示。图 9(a) 为透明化后的两单元反射相位; 图 9(b) 为反射相位差。透明化后的两种 AMC 单元在 11.3~17.3 GHz 频率范围内的相位差为  $180^\circ \pm 37^\circ$ , 满足式(7)对 RCS 缩减的要求。对比图 5 和图 9, 发现单元透明化前后的相位差频段趋于一致。这一结果证明了两种透明化单元可实现与透明化前一致的 RCS 缩减效果。

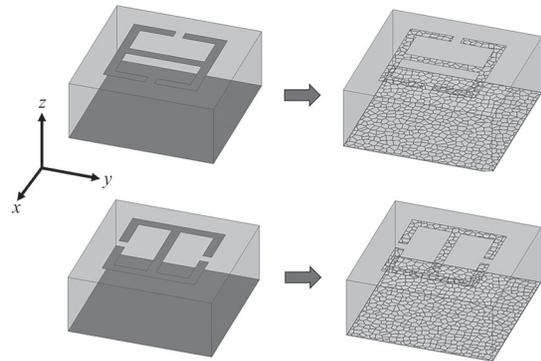


Fig.8 Transparency of chessboard units  
图 8 棋盘单元透明化示意图

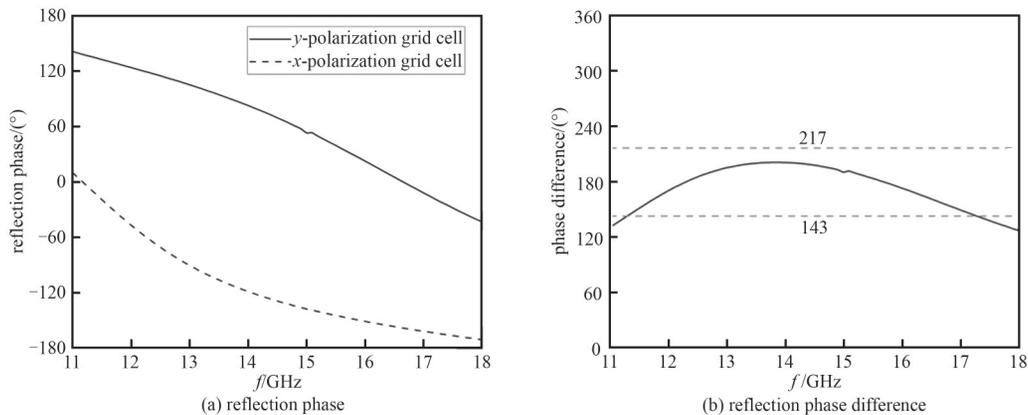


Fig.9 Phase and phase difference of chessboard unit after transparentizing  
图 9 透明化后棋盘单元相位及相位差

### 4 结论

本文提出一种基于 Voronoi 图金属微结构的透明化 RCS 缩减超表面, 其采用棋盘式阵列排布, 并以金属微结构替代连续金属薄膜。通过实验与仿真分析表明, Voronoi 图结构可显著提升超表面的透光率, 具有优良的衍射性能, 使超表面在 11.6~17.9 GHz 频段内实现超过 10 dB 的 RCS 减缩。通过以金属微结构取代超表面单元连续金属薄膜实现透明化后, 其单元前后相位响应趋于一致。综上所述, 本文设计的透明化超表面可在光学仪器窗口上实现宽频段 RCS 减缩, 所提出的金属微结构可为航空航天领域透明超表面的设计提供重要的技术参考。

#### 参考文献:

- [1] TAN Jiubin, LU Zhengang. Contiguous metallic rings: an inductive mesh with high transmissivity, strong electromagnetic shielding, and uniformly distributed stray light[J]. Optics Express, 2007, 15(3): 790–796. DOI:10.1364/oe.15.000790.
- [2] JENNIFER I H, RAMSEY K A, THOMAS M, et al. Predicted and measured transmission and diffraction by a metallic mesh coating[C]// Window and Dome Technologies and Materials XI. Orlando, Florida: SPIE, 2009: 73020Y. DOI:10.1117/12.818760.
- [3] MURRAY I B, DENSMORE V, BORA V, et al. Numerical comparison of grid pattern diffraction effects through measurement and modeling with OptiScan software[C]// Window and Dome Technologies and Materials XII. Orlando, Florida: SPIE, 2011: 80160U.
- [4] PIERATT M W, MURRAY I B, HIBBARD D L. Improved modeling of grid structures on optics: transmission, sheet resistance and diffraction effects[C]// Optical Fabrication and Testing. Monterey, CA: Optical Society of America, 2012. DOI:10.1364/oft.2012.otu4d.5.
- [5] 魏雅琪. 基于金属镀膜丝网的高透明度吸波与漫反射超材料[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023. (WEI Yaqi. Highly

- optically transparent absorption and diffusion metamaterials based on metallic mesh[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2023.) DOI:10.27389/d.cnki.gxadu.2022.002778.
- [6] 王大山. 基于反射式超表面的雷达散射截面缩减研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021. (WANG Dashan. Research on radar cross section reduction based on reflective metasurface[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2021.) DOI:10.27061/d.cnki.ghgdu.2021.003453.
- [7] NICHOLSON K J, BAUM T C, GHORBANI K. Conformal Voronoi metasurface antenna embedded in a composite structural laminate[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(7):3717–3725. DOI:10.1109/TAP.2020.3044663.
- [8] 崔文乐. 菲涅尔衍射的数值计算及其应用的研究[D]. 保定: 河北大学, 2020. (CUI Wenle. Study on numerical calculation of Fresnel diffraction and its application[D]. Baoding, Hebei, China: Hebei University, 2020.) DOI: 10.27103/d.cnki.ghebu.2020.000736.
- [9] 宫鹏, 徐桂成, 张斯特, 等. 菲涅尔衍射及有限时域差分在光栅仿真中的应用研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2022, 45(3):1–5. (GONG Peng, XU Guicheng, ZHANG Site, et al. Research of Fresnel diffraction and finite difference time domain in grating simulation[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2022, 45(3):1–5.) DOI:10.3969/j.issn.1672–9870.2022.03.001.
- [10] 张琦. 基于超表面的X波段低RCS宽带天线的设计与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021. (ZHANG Qi. Design and research of X-band low RCS broadband antenna based on metasurface[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2021.) DOI:10.27061/d.cnki.ghgdu.2021.001692.
- [11] PAQUAY M, IRIARTE J C, EDERRA I Ñ, et al. Thin AMC structure for radar cross-section reduction[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(12):3630–3638. DOI:10.1109/TAP.2007.910306.
- [12] 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.) DOI:10.11805/TKYDA2020420.

#### 作者简介:

刘润生(1999–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁超材料 .email:liurunsheng0407@163.com.

祁峰(1981–), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为太赫兹成像技术等.

汪业龙(1987–), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹电磁场等.

王安宁(1999–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁超材料性能分析.