

一种 S 频段具有 RCS 缩减特性的编码超表面*

李英嘉, 周云生, 祝大龙
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 设计了一种覆盖 S 频段的电控 1-bit 编码单元, 并对其进行了等效电路分析与参数优化, 单元在 0/1 两种工作状态下相位相差 180°; 以此为基础完成了 9×9 超表面阵列设计, 通过设置变容二极管两端的偏置电压, 使各个超表面单元能够根据设计需求在 0/1 两种工作状态之间切换, 从而实现反射电磁波能量干涉相消。仿真结果表明, 编码超表面阵列在 2 GHz~4 GHz 内相对于同尺寸的金属板能够实现 15 dB 以上的 RCS 减缩。

关键词: 反射型超表面; 遗传算法; 电控编码单元; RCS 减缩

中图分类号: TN972 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)05-0097-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211202001

引用格式: 李英嘉, 周云生, 祝大龙. 一种 S 频段具有 RCS 缩减特性的编码超表面[J]. 遥测遥控, 2022, 43(5): 97-104.

Design of a S-band coded metasurface with RCS reduction characteristics

LI Yingjia, ZHOU Yunsheng, ZHU Dalong

(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: Firstly, an electronically controlled 1-bit coding unit covering S-band is designed, and its equivalent circuit analysis and parameter optimization are carried out. The phase difference of the unit is 180° under two working states of 0/1; On this basis, the design of 9×9 metasurface array is completed. By adjusting the bias voltage at both ends of varactor, the working state of each unit is changed to eliminate the interference of reflected electromagnetic wave energy. The simulation results show that the coded metasurface designed in this paper can achieve RCS reduction of more than 15 dB compared with the metal plate of the same size in the range of 2 GHz~4 GHz.

Key words: Reflective metasurface; Genetic algorithm; Electronic control coding unit; RCS Reduction

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211202001

Citation: LI Yingjia, ZHOU Yunsheng, ZHU Dalong. Design of a S-band coded metasurface with RCS reduction characteristics[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(5): 97-104.

引 言

超表面是超材料的超薄二维形式, 由超表面单元在平面上紧密排布而成。编码超表面以编码的方式表征单元的空间排布, 通过调控加载在单元上的有源器件实现对编码状态的动态切换。相比传统的电子对抗方式, 超表面耗能小、重量轻, 可对入射电磁波直接进行转发; 超表面阵列能够对入射波的方向、极化和频率进行调制, 实现目标隐身和目标欺骗的功能。

哈佛大学 Nanfang Yu、Patrice Genevet 等人^[1]于 2011 年在《Science》上提出二维光学谐振器阵列, 当电磁波穿过两种介质之间的界面时, 二维谐振器阵列的存在能够在波长尺度上引入相位突变, 从而使光束产生异常反射/折射现象。与基于等效媒质理论的传统三维电磁超材料相比, 二维谐振器阵列利用“相位突变”取代了传统的“空间积累”实现对电磁波的调控, 减小了设计难度, 降低了制备成本, 且尺寸小、易于集成。

东南大学崔铁军课题组^[2]于 2014 年提出了数字编码超表面的概念, 利用数字编码代替等效媒质描述

*基金项目: 北京遥测技术研究所自研项目“数字编码电磁超表面设计与研制”(4600002762)

收稿日期: 2021-12-02 收修改稿日期: 2021-12-29

超材料^[3,4], 以 0/1 编码的方式实现对超表面阵列排布状态的表征, 引入有源器件 (如 MEMS 开关、二极管等) 实现对各个超表面单元工作状态的实时切换, 同一超表面平台在这种灵活高效的控制下能够根据需求实现不同的功能、适应不同的频段。

利用电控编码单元组成超表面阵列, 可以获得多种电磁功能的捷变调控^[5,6]。本文设计一款 S 频段编码超表面, 利用遗传算法优化排布结构, 使反射电磁波能量干涉相消, 降低目标在整个空间散射场的 RCS 峰值, 从而实现目标隐身^[7]。在被 S 频段平面波照射时, 相对于同尺寸的金属板, 超表面能够实现 15 dB 以上的 RCS 缩减。

1 S 频段超表面单元构型设计与参数优化

本文设计的单元结构如图 1 所示, S 频段入射波的波长范围为 75 mm~150 mm, 因此将单元的整体尺寸定为 50 mm×50 mm×10 mm。整个结构从上至下依次为: 金属贴片层、介质层、金属通孔、馈电网络、绝缘层、金属板。

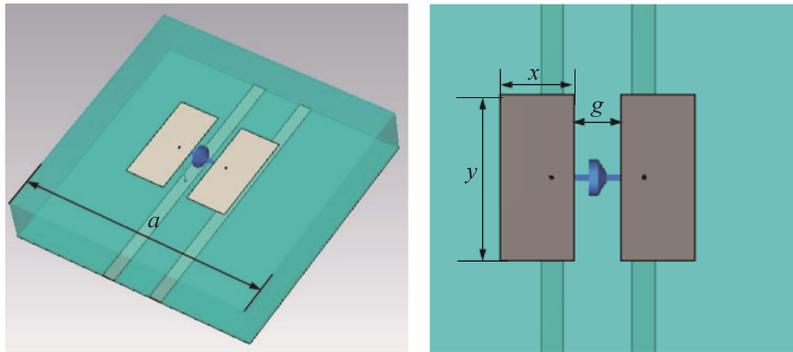


图 1 S 频段超表面单元结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of S-band supersurface unit

两个金属贴片宽度设为 $x=8$ mm, 贴片间隔 $g=5$ mm, 中间串联微波段变容二极管。介质层材料选用 F4B ($\epsilon_r = 2.65(1 - j0.001)$), 厚度 $h=10$ mm。馈电网络紧贴在介质层背面, 通过金属通孔与金属贴片层相连, 从而对变容二极管进行馈电。通过调整变容二极管两端的电压改变单元表面的等效阻抗, 从而改变超表面单元的工作状态和适应频率。

单元最底层的金属板可以防止入射电磁波透射, 如果与同为金属的馈电网络存在接触将会导致短路。因此, 本文在底层金属板和馈电网络之间添加了一层 0.2 mm 的绝缘体, 这样既有利于后期馈线的排布设计, 又能够弱化馈电网络对超表面单元电磁特性的影响。

在单元结构中引入有源器件能够在不改变单元构型尺寸的前提下, 实现对单元电磁响应的实时、动态控制^[8]。本设计选取的二极管 SMV2019-079LF 来自 Skyworks 公司, 电容变换范围为 0.24 pF~2.33 pF, 并且串联电阻较小, 相位噪声较低。SMV2019-079LF 的 SPICE 模型如图 2 所示, 利用 Advanced Design System 搭建 Port 1 和 Port 2 之间的提参电路从而分析两个端口之间的 Z 参数^[9]。

利用最小二乘法拟合 SMV2019-079LF 在不同偏置电压下的 Z 参数, 从而获取由电容 (Ce)、电感 (Le)、电阻 (Re) 组成的串联电路的等效电路参数, 见表 1。二极管两端电压从 -19 V 变化到 0 V 的过程中, 容值 Ce 从 0.24 pF 变到 2.33 pF, 电阻值从 2.38 Ω 增大到 4.51 Ω , 等效电感为 0.7 nH 不变。

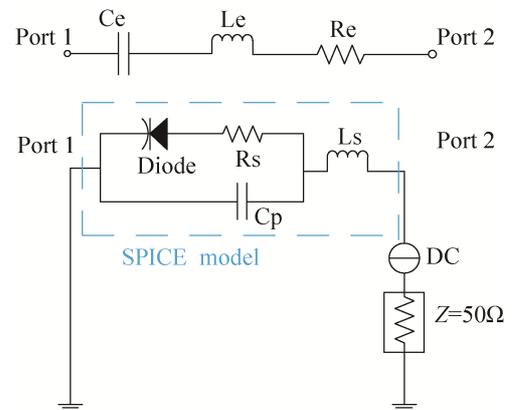


图 2 变容二极管等效电路示意图

Fig. 2 Varactor reference circuit

表1 在不同偏置电压下 SMV2019-079LF 的等效电路参数

Table 1 Equivalent circuit parameters of SMV2019-079LF under different bias voltages

Voltage (V)	Ce (pF)	Re (Ω)	Lc (nH)
0	2.33	4.51	0.70
-2	1.27	4.28	0.70
-6	0.63	3.79	0.70
-10	0.41	3.30	0.70
-16	0.27	2.66	0.70
-19	0.24	2.38	0.70

为了使单元 0/1 状态下的相位差在工作频段内尽可能完整地落在 170°~225°之间（即图 3 灰色区域），本文在调整二极管两端电压的同时，对单元上层贴片长度 y 分别为 10、12、14、16、18、20 (mm) 的几种情况分别进行了全波仿真并分析反射系数结果，如图 3 所示。

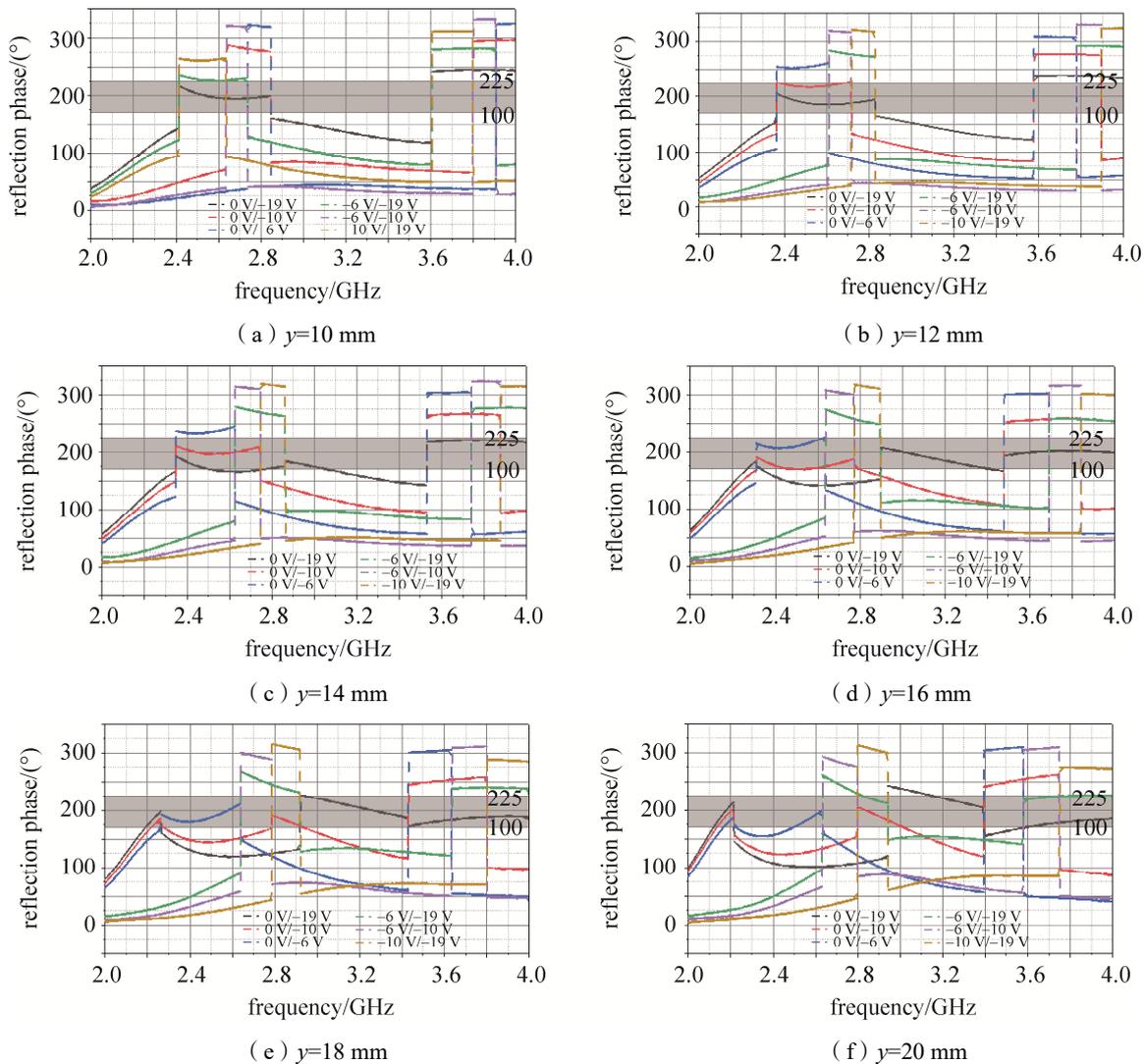


图3 2.0 GHz~4.0 GHz 不同贴片长度的单元在各偏置电压下的反射相位差

Fig. 3 2.0 GHz~4.0 GHz reflection phase difference of cell with different patch length under each bias voltage

经结果比对，在 $y=18$ mm 的情况下，通过调整变容二极管两端电压，可以使单元在 2.0 GHz~4.0 GHz 内 0/1 状态相位差范围基本满足设计要求。

综上, 单元结构尺寸参数为: $a=50$ mm, $h=10$ mm, $x=8$ mm, $y=18$ mm, $g=5$ mm。

2 单元性能仿真与分析

入射电磁波到达单元表面时, 表层的金属图案与二极管串联所形成的耦合单元会与电场产生电响应, 而单元上层和底层金属板会形成反向电流回路, 产生磁响应。本文利用电磁仿真软件 CST 分别对单元金属图案层的表面电场和散射波形进行仿真, 得到单元 0/1 两种状态下的电磁响应, 如图 4 所示。

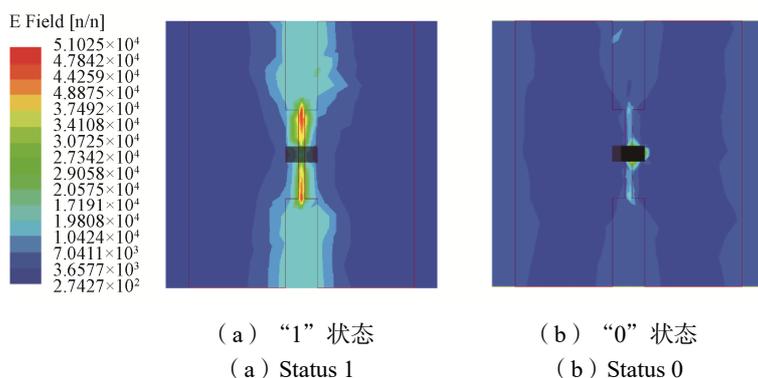


图 4 单元表面电场分布图

Fig. 4 Electric field distribution on unit surface

由仿真结果可以看出, “1” 状态下单元电场大部分集中在金属贴片中间的缝隙处; 而 “0” 状态时, 贴片间的电场基本消失。两种工作状态下的单元在不同频点处的散射波形也存在很大差异, 如图 5 所示。由此判断, 变容二极管在 0/1 两种工作状态下能够很大程度地影响超表面单元的电磁响应。可以以此为基础调整结构参数, 使单元实现设计所需的幅相响应特性。

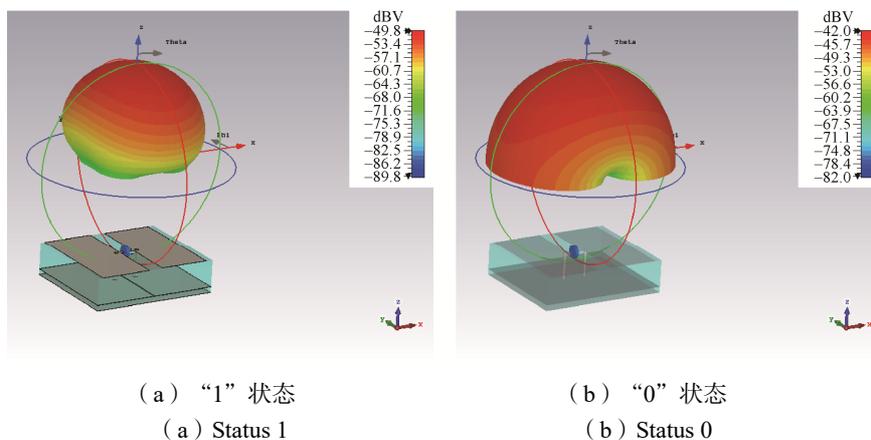


图 5 0/1 状态下单元的散射波形

Fig. 5 Scattering waveform of unit in state 0/1

在对单元反射系数 (S_{11}) 的仿真设置中, 通过添加 lumped element (集总元件) 实现对 SMV2019-079LF 等效电路的模拟。在 x 、 y 、 z 方向上分别使用 electric ($E_t=0$)、magnetic ($H_t=0$)、open (add space) 作为边界条件, 这样设置可以模拟阵列排布中的单元模型, 使独立单元的边界与阵列排布中的单元边界相一致; 最后利用 Time Domain Solver 得到超表面单元对 x 极化入射电磁波的反射幅度/相位响应。

仿真结果表明: 本文设计的单元在 2 GHz~4 GHz 频段内 0/1 两种工作状态下, 反射相位差在 $170^\circ\sim 225^\circ$ 范围内, 如图 6 所示, 与此同时反射幅度基本稳定。由此得出结论: 在工作频段内, 编码单元具备满足设计要求的幅度特性和相位特性, 并且能够实时动态地改变工作状态; 可以以此为基础进行反射型 1-bit 编码超表面的阵列设计。

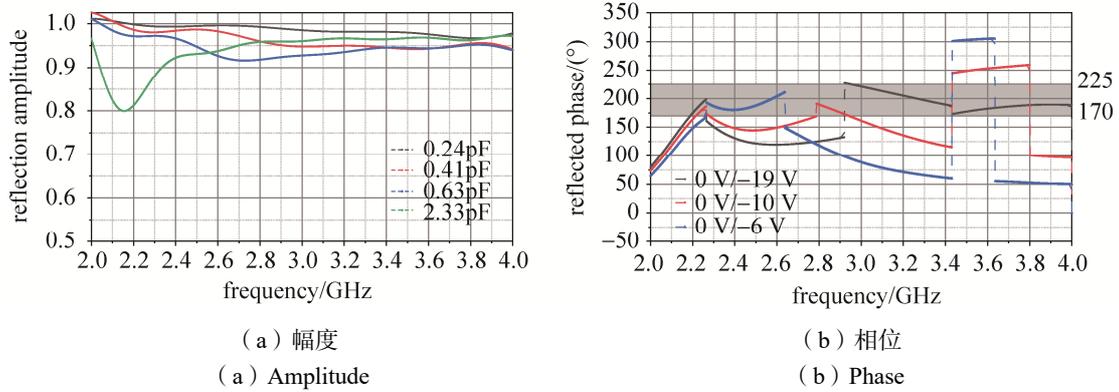


图 6 不同偏置电压下 S 频段超表面单元反射系数
Fig. 6 Reflection coefficient of S-band metasurface element under different bias voltages

3 S 频段超表面阵列设计

3.1 阵列设计方法

本节基于前两章设计的 S 频段编码单元开展超表面阵列设计, 整个表面由 $N \times N$ 个阵元组成 ($N=9$)。根据入射频率调整变容二极管两端偏置电压, 使“0”单元和“1”单元的相位差保持在 $170^\circ \sim 225^\circ$ 之间。利用单元 0/1 两种工作状态下低损耗、相位相反的特性对编码单元进行合理的空间排布, 使垂直入射的电磁波在后向方向上能量干涉相消, 实现 RCS 缩减。

设超表面上第 (m, n) 个阵元的反射相位为 $\varphi(m, n)$, 根据 1-bit 编码超表面单元的相位特性, 阵元的反射相位 $\varphi(m, n)$ 只有 0 和 π 两种状态。超表面阵列在正入射的平面波激励下产生的远场散射的幅度函数为^[10,11]:

$$|f(\theta, \varphi)| = N \cdot N \operatorname{sinc} \left[m\pi(p+1/2) - \frac{m}{4} kT_x \sin \theta \cos \varphi \right] \cdot \operatorname{sinc} \left[n\pi(q+1/2) - \frac{n}{4} kT_y \sin \theta \sin \varphi \right] \quad (1)$$

其中, θ 和 φ 分别表示散射波束俯仰角和方位角, $k = 2\pi/\lambda$, $p, q = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, T_x 和 T_y 分别为编码沿着 x 方向和 y 方向排列的周期长度, 其方向系数可以表示为:

$$Dir(\theta, \varphi) = \frac{4\pi |f(\theta, \varphi)|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} |f(\theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi} \quad (2)$$

当 θ 和 φ 满足以下条件时, 远场散射的幅度达到第一个极值点:

$$\varphi = \pm \tan^{-1} \frac{T_x}{T_y}, \varphi = \pi \pm \tan^{-1} \frac{T_x}{T_y} \quad (3)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\lambda \sqrt{\frac{1}{T_x^2} + \frac{1}{T_y^2}} \right) \quad (4)$$

超表面在被 S 频段平面波垂直入射时, 可以根据式 (3)~式 (4) 分别计算反射波束的方位角和俯仰角。

为了能够最大程度地缩减表面 RCS, 本文将阵列模式综合 APS (Array Pattern Synthesis) 与遗传算法 GA (Genetic Algorithm) 结合起来优化设计超表面阵列的编码排布, APS-GA 的算法流程如图 7 所示。

在每一次迭代后，APS 模块都会接收到 GA 模块发送的相关信息，每个个体（阵列编码排布方式）的适应度值（fitness）为：

$$fitness = 1 / \min(\max(|f(\theta, \varphi)|)) \quad (5)$$

式（5）表征的是将超表面产生的电场辐射的最大值最小化，超表面的 RCS 缩减效果越好，适应度值越大。整个算法的核心是 GA 模块生成超表面的阵列编码排布状态，APS 模块基于当前的编码序列计算出表面的 RCS 以判断其性能，并将适应度值结果返回到 GA 模块。

经过多次迭代，可以得到最佳解（即适应度值最大情况下的编码阵列排布），此种排布状态下的编码超表面在 S 频段电磁波入射时 RCS 值相对于金属表面存在较大程度的缩减。

利用 MATLAB 计算得到最佳解的编码排布状态下超表面远场散射图，和全 1 编码超表面的远场散射图的对比如图 8 所示。

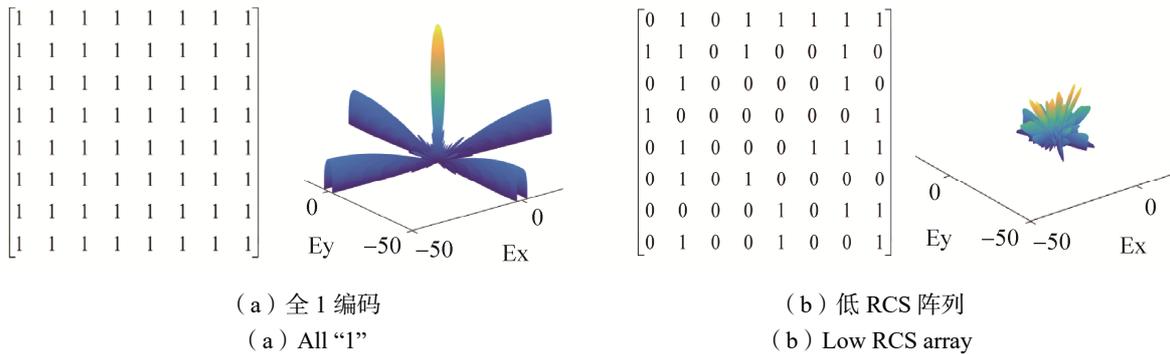


图 8 不同超表面远场散射图对比
Fig. 8 Comparison of farfield scattering pattern of different metasurface

3.2 仿真与验证

本文设计的超表面阵列由 9×9 个编码单元组成，单元整体尺寸为 50 mm×50 mm×10 mm，单元中金属图案层面积为 21 mm×18 mm，设计完成的超表面阵列总尺寸为 450 mm×450 mm×10 mm。

在单元设计中，边界条件设置为 Floquet Boundary（浮边界），这种仿真条件下的单元在 x 和 y 方向上会被与其相同的单元包围。然而，具有 RCS 缩减特性的编码超表面中的阵元不是按周期分布的，因此，周围单元的编码状态不一定与中心单元的编码状态一致，这种情况下每个阵元所表征出的幅相特性会和单个阵元设计中 Floquet Boundary 条件下仿真得到的单元幅相特性有很大差别。因此，相较于传统的编码超表面设计，本文通过适当地增大单元中介质层和金属底板的面积使阵列表面的金属图案层形成相对稀疏的排布，减小了不同编码状态的相邻阵元之间产生的耦合影响，降低编码单元的不规律排列对其幅相特性的影响，如图 9 所示。

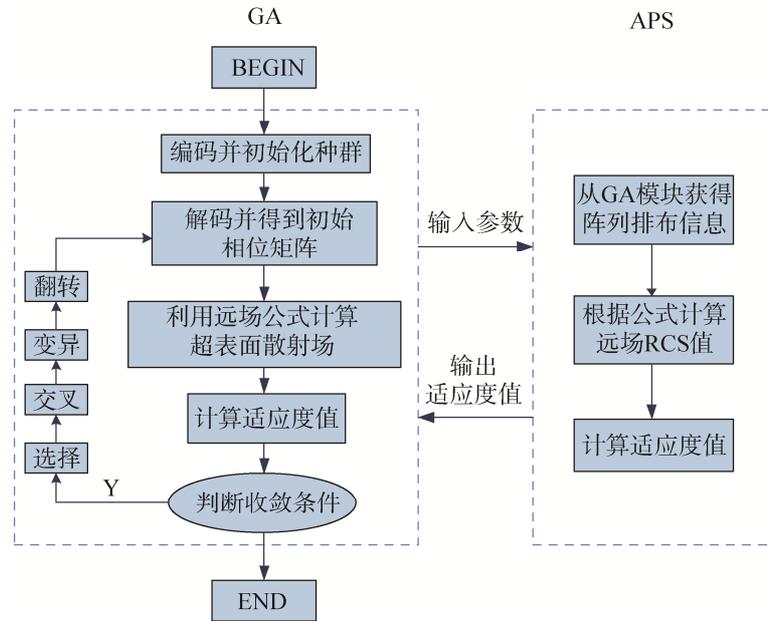


图 7 APS-GA 算法流程图
Fig. 7 APS-GA algorithm flow chart

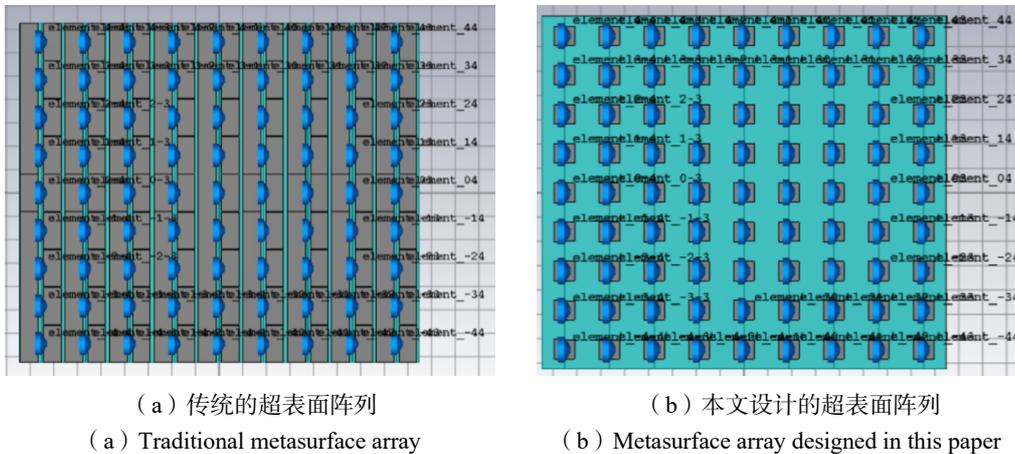


图 9 9×9 编码超表面结构示意图
Fig. 9 9×9 coded metasurface structure diagram

本文利用 CST 对阵列表面进行全波仿真，边界条件设置为 open (add space) 以模拟实际工作情景，并设置 Field Monitors (现场监测仪)；同时选取尺寸与该超表面相同的金属平板进行仿真，从而对比较证超表面的 RCS 缩减效果。编码超表面和金属平板在工作频段下的 1D&3D 远场方向图仿真结果如图 10 所示。当电磁波垂直入射到 1-bit 编码超表面上时，相对于同尺寸的金属板，编码超表面可在 2 GHz~4 GHz 频带范围内基本实现 15 dB 以上的 RCS 减缩。

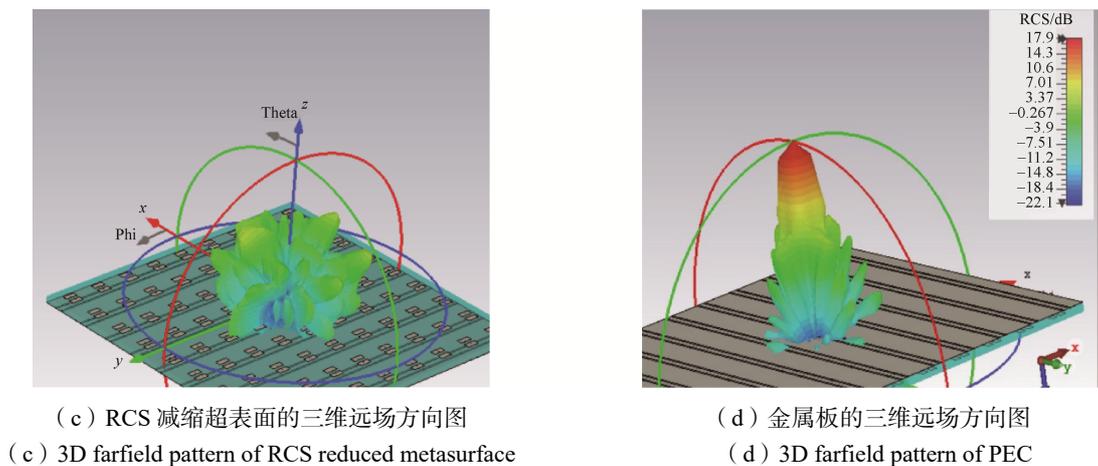
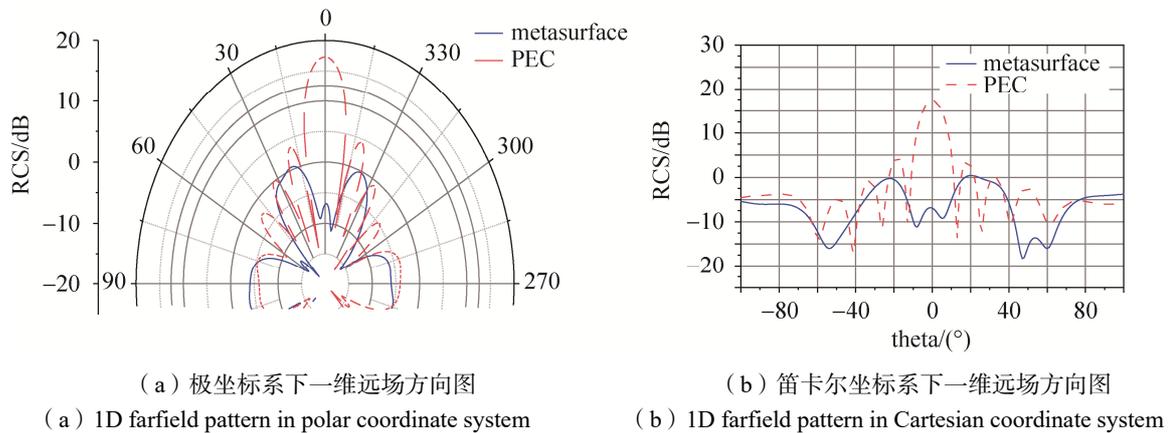


图 10 1D&3D 远场方向图对比
Fig. 10 Comparison of 1D & 3D far-field patterns

4 结束语

本文提出了一种能覆盖整个 S 频段的低 RCS 阵列超表面, 整个结构由 9×9 个单元尺寸为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的编码单元组成, 超表面阵列总尺寸为 $450 \text{ mm} \times 450 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。本文通过调控单元上的变容二极管改变单元反射系数, 使编码单元适应不同入射波频率; 利用 APS-GA 算法设计超表面阵列排布, 使电磁散射波能量干涉相消, 在整个工作频段内都能够实现 15 dB 以上的 RCS 减缩。

参考文献

- [1] YU N, GENEVET P, KATS M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333–337.
- [2] CUI T, QI M, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable meta-materials[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e218.
- [3] GIOVAMPAOLA C D, ENGHETA N. Digital metamaterials[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(12): 1115–1121.
- [4] 崔铁军. 电磁超材料—从等效媒质到现场可编程系统[J]. *中国科学: 信息科学*, 2020, 50(10): 1427–1461.
CUI Tiejun. Electromagnetic metamaterials—from effective media to field programmable systems[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2020, 50(10): 1427–1461.
- [5] 张梓福. 可编程超表面电磁波散射特性及其优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [6] 戴俊彦, 崔铁军. 非线性超表面新模式: 时空编码数字超表面[J]. *物理*, 2021, 50(5): 293–299.
- [7] 赵捷. 新型人工电磁表面在隐身中的研究与应用[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [8] LI T, YANG H, LI Qi, et al. Active metasurface for broad band radiation and integrated low radar cross section[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(3): 1161–1172.
- [9] 廖大双. 可重构超表面对电磁波调控的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [10] 杜世森. 数字编码超材料的设计与应用[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2019.
- [11] 张婷. 应用于波束反射的编码超表面研究与设计[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2020.

[作者简介]

李英嘉 1997 年生, 硕士, 主要研究方向为精确制导与电子对抗。

周云生 1980 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为微波毫米波电路设计。

祝大龙 1963 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为航天与航天电子信息对抗系统装备研制。

(本文编辑: 傅 杰)

关于《遥测遥控》编委会聘请人员的公告

根据上级单位对中国航天科技集团有限公司第九研究院第七〇四研究所主要领导岗位人员调整的决定, 以及《遥测遥控》编委会章程第七条的规定, 决定聘请李凉海同志担任第六届《遥测遥控》编委会顾问, 聘请于勇同志担任第六届《遥测遥控》编委会主任委员, 聘请赵颖同志担任第六届《遥测遥控》编委会委员。

特此公告。

中国航天科技集团有限公司第九研究院第七〇四研究所

2022 年 9 月 8 日