

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230228002

文章编号: 1672-9331(2024)04-0160-08

引用格式: 陈冉昊, 卞立安, 郭志清, 等. 动态调控的低 RCS 随机编码超表面阵列[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(4): 160-167.

Citation: CHEN Ranhao, BIAN Li'an, GUO Zhiqing, et al. Random coding metasurface array with dynamically tunable low RCS[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(4): 160-167.

动态调控的低 RCS 随机编码超表面阵列

陈冉昊, 卞立安, 郭志清, 李延秀, 黄元芯, 彭诗棧

(长沙理工大学 物理与电子科学学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】针对雷达隐身问题, 设计了一款具有动态散射特性的 1-bit 编码超表面阵列, 该阵列可实现雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 的宽带缩减。【方法】利用随机编码的方法, 可快速得到多种超表面的编码序列, 避免使用同一算法时因编码序列不同而产生的仿真误差。阵列由两种单元组成, 每种单元的上层贴片均采用风车形状。通过控制 PIN 二极管的通断状态, 实现单元“0”和“1”之间的相互转换。将两种单元进行非周期随机编码, 使阵列的反射方向图呈漫散射状, 有效降低了天线的 RCS。【结果】仿真结果表明, 在 x 极化波垂直入射的情况下, 所设计的三种随机编码超表面在 8.2~13.2 GHz (相对带宽为 46.7%) 频段内 RCS 缩减量大于 8.0 dB, 最大缩减量可以达到 18.8 dB。【结论】本文提出的编码超表面阵列可有效实现 RCS 的缩减, 在雷达隐身技术方面具有广泛的应用前景。

关键词: 编码超表面; RCS 缩减; 随机编码; 能量散射; 动态调控

中图分类号: TN82

文献标志码: A

Random coding metasurface array with dynamically tunable low RCS

CHEN Ranhao, BIAN Li'an, GUO Zhiqing, LI Yanxiu, HUANG Yuanxin, PENG Shiyao

(School of Physics & Electronic Science, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] To solve the radar stealth problem, a 1-bit coding metasurface array with dynamic scattering characteristics was designed, which could realize the wideband reduction of radar cross section (RCS). [Methods] The coding sequences of various metasurfaces were obtained quickly by using the random coding method, and the simulation errors caused by different coding sequences were avoided when the same algorithm was used. The array was composed of two kinds of elements with a pinwheel shape on the upper layer patch. By controlling the ON/OFF state of the PIN diode, the conversion between elements “0” and “1” was realized. The RCS of the antenna was effectively reduced by the non-periodic random coding of the two elements, which made the reflection pattern of the array appear diffuse scattering. [Findings] The simulation results show that the RCS reduction of the three random coding metasurfaces is greater than 8 dB, and the maximum reduction can reach 18.8 dB in the frequency band of 8.2~13.2 GHz (relative bandwidth is 46.7%) when the x-polarized wave is vertically incident. [Conclusions] The coding metasurface array proposed in this paper can effectively achieve RCS reduction and has a wide

收稿日期: 2023-02-28; 修回日期: 2023-04-23; 接受日期: 2023-04-23

基金项目: 湖南省教育厅科学研究优秀青年项目 (21B0278)

通信作者: 卞立安 (1985—) (ORCID: 0000-0002-2859-0650), 男, 讲师, 主要从事天线与电磁防护方面的研究。

E-mail: dk061bianlian@126.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

application prospect in radar stealth technology.

Key words: coding metasurface; RCS reduction; random coding; energy scattering; dynamic modulation

Foundation item: Project (21B0278) supported by the Scientific Research Fund of Hunan Provincial Education Department

Corresponding author: BIAN Li'an (1985—) (ORCID: 0000-0002-2859-0650), male, lecturer, research interest: antenna and electromagnetic protection. E-mail: dk061bianlian@126.com

0 引言

随着进入信息化时代,各国越来越重视军事发展,雷达隐身领域逐渐成为各国研究的重要战略领域。对于雷达隐身技术而言,主要通过改变雷达回波信号来减小被检测到的概率,而雷达散射截面(radar cross section, RCS)就是衡量目标在雷达波照射下产生回波信号的重要物理量,它的值越低,代表雷达隐身的效果越好。

传统降低 RCS 主要是通过外形结构设计^[1]、涂覆吸波材料^[2]等方法来实现,但对天线的辐射性能会造成一定的影响。超表面是一种人工构成的特殊电磁材料,有着自然界难以存在的超常电磁特性。超表面作为超材料的二维形态,除了具有低剖面、易制备和设计简单等特点,其在电磁结构设计中也展现出更多的功能和更大的灵活性^[3]。通过在天线上加载超表面以实现 RCS 的缩减可有效避免对天线自身性能造成影响。随着研究人员的探索,目前已经设计出的各种超表面都在缩减 RCS 方面得到了广泛应用,如人造磁导体^[4]、频率选择表面^[5-8]和吸波体^[9]等。

2014年,东南大学崔铁军教授团队首次提出编码超表面的概念,为超表面的结构设计提供了新的思路^[10]。数字编码超表面是由有限个基本单元按照一定的编码序列排布而成,通常编码序列的生成会与智能算法相结合^[11],只需调整排布就可以直接控制天线的性能,实现对电磁波的动态调控,极大简化了设计流程。同时在超表面中引入数字编码的概念,也适合与 MEMS 开关、PIN 二极管等可调节器件相结合,在 FPGA 的控制下形成可编程超表面,实现不同功能之间的实时转换。数字编码超表面可实现电磁波的任意调控,大大减小金属或介质目标的 RCS,逐渐成为近几年研究的重点。文献[12]通过使用编码频率选择表面

替换天线接地层来实现最大 RCS 缩减和最佳带宽,仿真和测试表明在 6.3~12.0 GHz 频段内可实现 10 dB 以上的缩减。文献[13]在微带天线周围加载编码超表面,使反射的能量被扩散到更多方向,在 6.0~7.6 GHz 和 9.5~26.0 GHz 频段内实现了显著的 RCS 降低,同时保留了天线的辐射性能。文献[14-16]均提出了不同图案的反射相位差 180°的编码超表面单元,该编码超表面单元按照非周期的排布方式组成阵列,能够显著减小目标的 RCS,实现辐射散射一体化设计。文献[17]在编码超表面上加载 PIN 二极管,提出具有动态散射性能的低 RCS 编码超表面阵列,通过控制二极管的状态,在不降低其辐射特性的情况下动态调整天线阵列的散射特性,比较几种不同的棋盘布局,均可在 9.0~10.5 GHz 频段内实现 10 dB 以上的缩减。虽然上述研究在天线 RCS 缩减方面取得了一定的效果,但是仍有改善和优化的空间。文献[12]和文献[13]将天线与超表面分开设计,设计过程中无法对组合后的天线辐射性能进行评估。文献[14-16]虽然将天线设计与超表面设计融为一体,但仍需要设计两种贴片形状,增加了设计难度,并且天线的辐射特性和散射特性是固定的,只能适用于当前的应用场景。文献[17]采用加载 PIN 二极管的方式,仅需要设计一种贴片形状,但采用不同的棋盘布局, RCS 缩减 10 dB 以上的带宽较窄,不利于实际应用。

针对以上问题,本文提出一种可实时调控的低 RCS 天线。利用风车形状作为超表面单元,设计了一款由 16×16 个阵元组成的 1-bit 非周期布局的阵列。利用随机编码理论,设计出三种随机编码排布方式,讨论了单元排布方式对 RCS 缩减特性的影响。仿真结果表明,在 x 极化波垂直入射的情况下,所设计的三种随机编码超表面在 8.2~13.2 GHz (相对带宽为 46.7%) 频段内 RCS 缩减量大于 8.0 dB,最大缩减量可以达到 18.8 dB。利用

这种编码方式能够简单灵活地实现编码超表面 RCS 的缩减,在雷达隐身技术方面具有广泛的应用前景。

1 1-bit 编码超表面设计

1.1 编码超表面结构模型

如图 1 所示,本文所设计的 1-bit 编码超表面由反射相位差为 180° 的单元“0”和单元“1”组成。通过现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)对 PIN 二极管施加控制电压,使单元实现“0”和“1”之间的动态转换,达到对电磁波的精准控制。

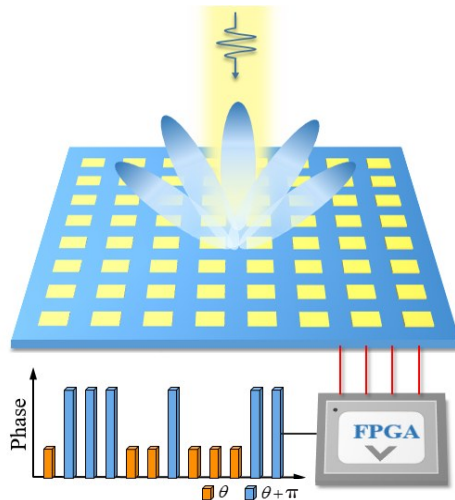
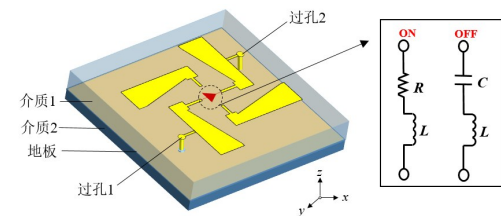


图 1 编码超表面概念图

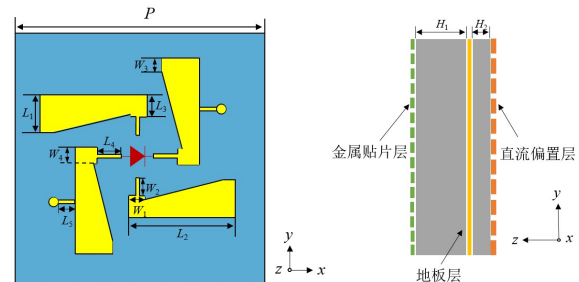
Fig. 1 Conceptual diagram of coding metasurface

超表面单元模型如图 2 所示,具体尺寸参数如表 1 所示。图 2 中编码超表面主要由三部分组成:相控金属贴片层、介质基板层和用于向二极管提供电压的直流偏置层。超表面上层金属图案选用风车形结构作为基本元素,加载在边长为 P 、厚度为 H_1 的 Rogers RO4350B 介质基板上,其相对介电常数为 3.66,损耗正切为 0.003 7。下层介质基板采用厚度为 H_2 的 F4B 材质,其相对介电常数为 2.65,损耗正切为 0.001 0。上、下两层介质板之间用厚度为 0.018 mm 的铜作为金属地板,可最大限度避免可控单元和偏置电路的相互影响。型号为 MADP-000907-14020P 的二极管加载到风车叶片之间。当二极管处于导通(ON)状态时,可以等效为一个由 7.8Ω 电阻与 30 pH 电感组成的串联电

路;当二极管处于截止(OFF)状态时,可以等效为一个由 28 fF 电容和 30 pH 电感组成的串联电路。过孔 1 连接贴片至直流偏置层,过孔 2 连接贴片至中间地板层。二极管处于截止状态时的基本单元视作“0”单元,二极管处于导通状态时的基本单元视作“1”单元。当 PIN 二极管 ON/OFF 时,加载的二极管可等效为不同的电路,整个单元的谐振特性也会随之改变。直流偏置线分布在整个结构的底层,通过金属柱与上层金属贴片相连,为 PIN 二极管供电。256 个金属贴片周期性排列在 16×16 编码超表面阵列下方,便于独立控制每个 PIN 二极管的通断状态。根据等效电路原理,上层金属贴片可以等效为电感,相邻贴片之间的间距可以等效为电容,在左右两个贴片之间加载 PIN 二极管来改变电流路径长度。引入上下两个寄生贴片来拓宽天线的带宽,提高单元反射幅度。



(a) 单元整体结构示意图和 PIN 二极管等效电路



(b) 单元结构俯视图

(c) 单元结构侧视图

图 2 单元结构示意图

Fig. 2 Unit structure diagram

表 1 单元参数

Table 1 Unit parameters mm

参数	数值	参数	数值	参数	数值
L_1	2.10	L_5	1.00	W_4	0.80
L_2	5.40	W_1	0.80	P	15.50
L_3	1.00	W_2	1.00	H_1	3.20
L_4	1.60	W_3	0.61	H_2	0.50

1.2 随机编码原理与方法

本文在编码超表面单元研究与设计的基础上,进一步验证其对电磁散射的调控功能,最终形成RCS缩减的可编程超表面。

假设超表面由 $N \times N$ 个单元组成,当电磁波垂直入射到超表面时,其远场散射可以表示为

$$f(\theta, \varphi) = f_e(\theta, \varphi) \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \exp \{ -i \{ \varphi(m, n) + kd \sin \theta [(m - \frac{1}{2}) \cos \varphi + (n - \frac{1}{2}) \sin \varphi] \} \} \quad (1)$$

式中: $f_e(\theta, \varphi)$ 为每个单元的辐射强度; θ 和 φ 分别为任意方向上的俯仰角和方向角; $k = 2\pi/\lambda$ 为传播常数, λ 为电磁波在自由空间中的波长; d 为单元之间的间距。

由式(1)可以看出,不同的编码单元排布方式会产生不同的方向函数,对超表面所叠加得到的总场方向函数也会产生一定的影响,所以可以通过使用不同的排布方式来实现超表面远场散射特性的改变。根据能量守恒定理,总能量不变,反射方向越多,每个方向的能量就越低,从而达到缩减RCS的目的。如果想让超表面在垂直方向上的主瓣能量低,就要产生更多的旁瓣将电磁波的能量分散。因此,本文采用随机排布算法,探究不同的编码序列对RCS缩减效果的影响。

随机排布的生成主要借助rand函数。函数每运行一次,其结果都不相同,所以代入运算生成3种随机排布。当编码单元“0”和“1”的数量满足1:1时,RCS缩减效果最好。在编码序列生成时,加入判断语句用于检查生成的编码序列中单元个数是否满足1:1,如果不满足则须继续生成新的编码序列,直至两单元数量比为1:1。编码超表面由 8×8 个编码子阵列构成,每个子阵列又由 2×2 个超级子单元构成。此外,通过式(1)可以对排列好的远场进行预先计算,从而选出结果较优的排布序列。非周期性排列的编码超表面具有非定向散射特征,可以有效实现RCS的缩减。

所有PIN二极管在都处于“ON”或“OFF”状态时,不能达到降低RCS的效果。只有当两个具有不同散射系数的单元在天线阵列中按照一定的编码序列排布时,才能够获得有效的散射零点。为了探索随机编码超表面应用于RCS缩减的可行性,设计了三种不同的随机编码排布,如图3所示,

深色格子代表“OFF”状态,浅色格子代表“ON”状态。

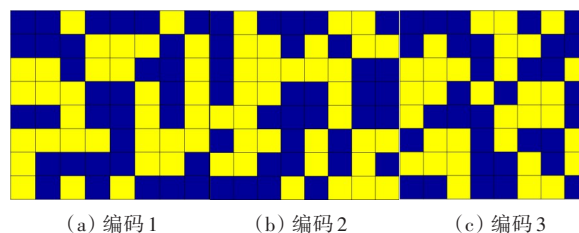


图3 三种随机编码超表面的排布示意图

Fig. 3 Arrangements of three random coding metasurfaces

2 仿真结果与分析

图4为“0”单元和“1”单元在 x 极化入射波垂直照射时的反射幅度和反射相位图。从图中可以得出,在 9.7~12.3 GHz 频段范围内可以满足相位差为 $180^\circ \pm 37^\circ$ 的条件,且反射幅度在 -2 dB 以内,能够有效实现电磁的相位调控。当 y 极化波照射时,由于PIN二极管加载在超表面的 x 方向与 y 极化入射波相隔离,所以 y 极化波入射时的“0”单元和“1”单元的反射幅度与相位重合。

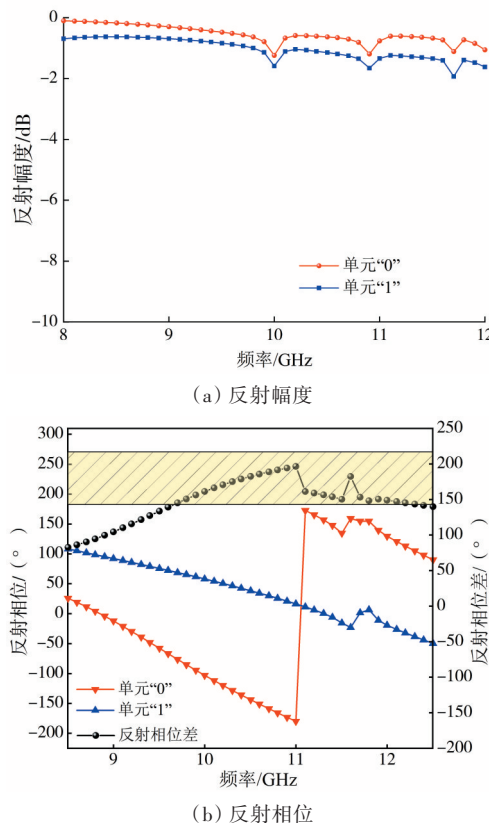


图4 “0”单元和“1”单元的反射幅度和反射相位

Fig. 4 Reflection magnitude and reflection phase of “0” and “1” unit

为了深入研究二极管不同状态对超表面单元的影响,本文进一步分析了10 GHz处二极管导通和截止时单元表面电流分布情况,结果如图5所示。等效电场的零点位于与PIN二极管相连两个贴片的横向中点附近,根据偏置电路设计规则,单元设计选择异侧馈电具有良好的RCS缩减效果。此外,将直流偏置线与地线偏置线置于风车型贴片的异侧可避免不必要的极化转换,保证单元性能稳定。由图5(a)可以看出,当二极管导通时,大部分电流集中于与二极管相连的两个贴片及靠近二极管的寄生贴片的边缘区域,而寄生贴片的其他区域电流非常小,电流可以经由二极管在两个贴片之间流通。当二极管处于截止状态时,如图5(b)所示,单元大部分区域电流分布较弱,只有部分贴片边缘区域有较强的电流,这是由于二极管的截止阻挡了电流的流通。综上所述,二极管的状态会对天线的表面电流分布造成很大的影响,所以仅需控制二极管的ON/OFF状态即可使两种单元出现有效相位差。

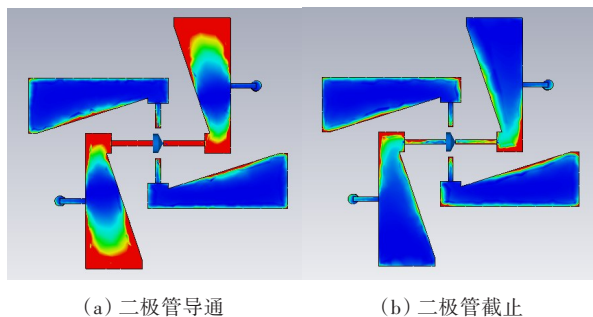


图5 10 GHz处单元的表面电流分布

Fig. 5 Surface current distribution of unit at 10 GHz

利用时域求解器对三种排布方式的编码超表面进行数值模拟仿真,采用平面波入射对其进行激励,入射方向为 $-z$ 轴方向,以模拟在实际场景中的雷达探测,最终得到垂直入射时的RCS缩减效果。图6为三种随机编码超表面在10 GHz处的远场散射结果,可以看出三种随机编码序列的能量没有集中在单个方向,都向四周不规则地散射,表明这三种随机编码超表面都能够将入射波漫反射,具有较好的RCS缩减能力。

为探究不同超单元组合对超表面RCS缩减特性的影响,本文设计了基本单元为 1×1 、 2×2 和 3×3 的超单元按照编码1的方式进行排布。采用超单元主要有两个方面的原因:第一是为了让具有相

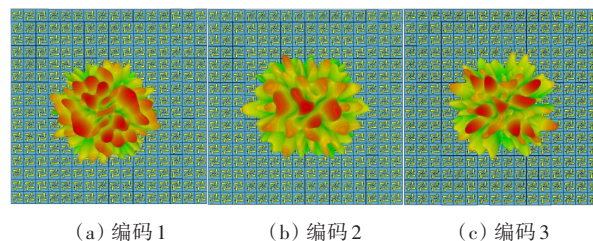


图6 三种随机编码超表面在10 GHz时的远场散射结果

Fig. 6 Far-field scattering results of three random coding metasurfaces at 10 GHz

同相位的单元集中,保持单元有稳定的反射相位响应,相邻单元种类不同会对反射相位造成一定的影响,最终有可能导致超表面调控电磁波的能力降低;第二是为了增加编码序列的周期长度,使电磁波可以更均匀地散射到四周。图7为在不同超单元组合下编码1的RCS缩减情况。可以看出,随着超单元基本单元个数的增加,RCS缩减效果逐渐变好,且缩减效果最好的频段向低频移动。超单元为 1×1 的阵列在11.5~13.0 GHz频段内RCS缩减效果较好,但在靠近基本单元中心频率处RCS缩减量仅略大于10.0 dB。超单元为 2×2 的阵列RCS缩减量为10.0 dB以上的频段范围变宽,在靠近中心频率处RCS缩减效果最好且最高缩减量也有所增加。相较于 2×2 和 1×1 超单元的阵列,超单元为 3×3 的阵列靠近中心频率,RCS最高缩减量增加且向低频移动,但在高频区缩减效果较差,缩减带宽较窄。为了达到RCS缩减量为10.0 dB以上的频段范围最宽的目的,最好采用 2×2 的基本单元作为一个超单元进行仿真。

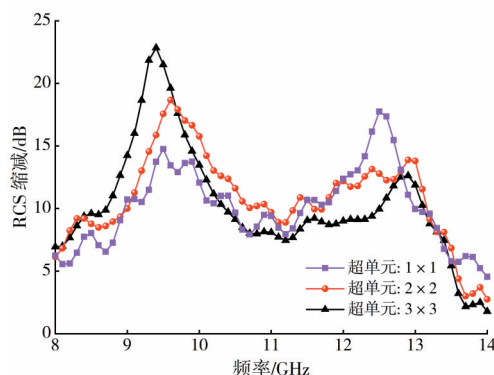
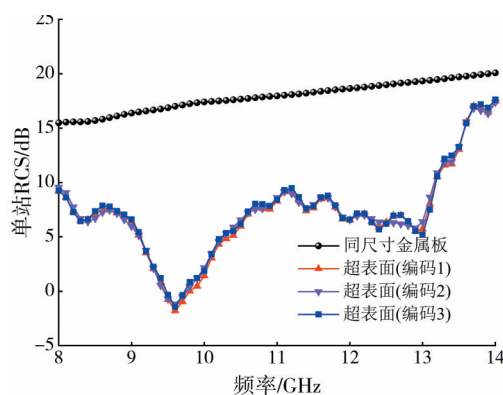


图7 不同超单元组合下编码1的RCS缩减

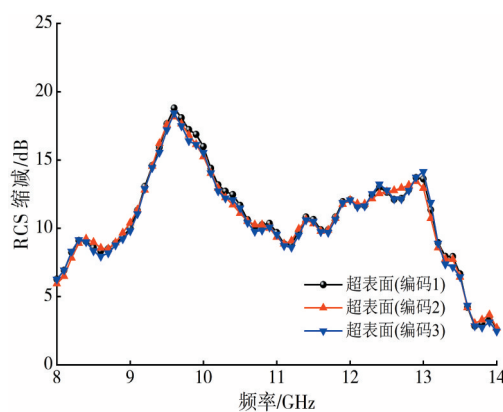
Fig. 7 RCS reduction of coding 1 at different supercell combinations

图8为垂直入射时三种随机编码超表面的单站RCS和RCS缩减情况。可以看出,无论编码超

表面采用哪种布局,均可以在一定程度上实现RCS的缩减。不同编码序列的仿真结果具有高度一致性,能有效地避免使用同一算法时因编码序列不同而产生的仿真误差。通过图8(b)可以看出,相较于同尺寸的金属表面,编码超表面在9.0~11.0 GHz(相对带宽为20%)和11.8~13.1 GHz(相对带宽为10.4%)两个频段内都可以达到RCS缩减10 dB以上的效果。若将缩减条件放宽到8 dB,符合要求的频段将扩大到8.2~13.2 GHz(相对带宽为46.7%)。随机编码能够增加编码阵列的混乱程度,产生更多的旁瓣,此时电磁波被均匀地散射到四周,使单个方向的散射能力减弱,从而达到RCS缩减的效果。该结果进一步验证了随机编码方法的可行性。



(a) 单站 RCS



(b) RCS 缩减

图8 编码超表面和金属板的RCS仿真结果

Fig. 8 RCS simulation results of coding metasurfaces and metallic plate

此外,为了进一步分析编码超表面的远场散射特性,通过远场仿真得到垂直入射时 xoz 平面上8.5 GHz、10.0 GHz、11.5 GHz和13.0 GHz处编码超

表面和金属板的散射方向图,如图9所示。由图9可以看出,金属表面在4个频率下垂直方向的主瓣均能量较强,在雷达探测时极易被敌方发现。当频率为8.5和13.0 GHz时,相对于金属表面,编码超表面对主瓣有一定的抑制作用;当频率为10.0和11.5 GHz时,编码超表面对主瓣的抑制作用最强。由此可知,越靠近基本单元的中心频率时,RCS缩减效果越好。

表2给出了本文设计的编码超表面与其他超表面的性能对比,包括布阵方式、工作频段和8 dB以上单站RCS缩减带宽。由表2可以看出,本文所设计的超表面RCS缩减频段较宽,优于其他的结果。

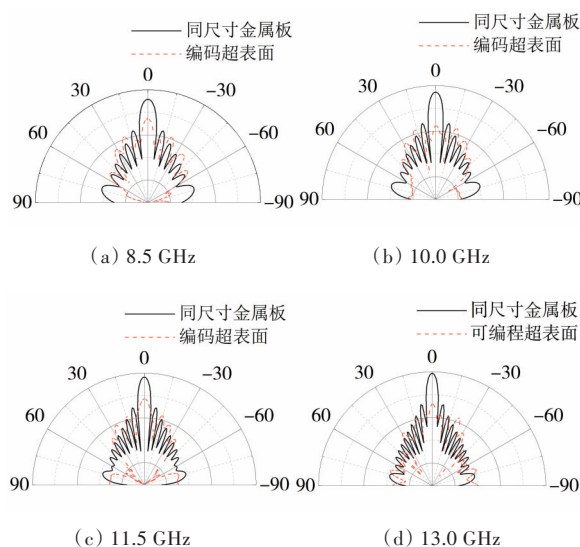
图9 xoz 平面下不同频率的编码1和同尺寸金属板的散射特性对比图Fig. 9 Scattering characteristics of coding 1 and similar-sized metallic plates at different frequencies in xoz plane

表2 几种编码超表面阵列参数性能对比

Table 2 Parameter performance comparison of several coding metasurface arrays

文献	布阵方式	工作频段/GHz	单站 RCS 8 dB 缩减带宽/GHz
[14]	非周期	9.5~10.0(14.6%)	4.8~5.2(8.0%) 5.8~6.9(17.3%)
[15]	非周期	5.8~8.7(40.0%)	5.3~7.5(34.4%)
[16]	非周期	16.35~22.1(29.9%)	16.2~22.3(31.7%)
[17]	棋盘	9.5~10.0(14.6%)	9.1~10.5(14.3%)
[18]	非周期	8.0~12.0(40.0%)	8.0~12.0(40.0%)
本文	非周期	9.7~12.3(23.6%)	8.2~13.2(46.7%)

3 讨论

为解决雷达隐身的问题,本文利用非周期排布的编码超表面实现RCS缩减的功能。文中使用随机编码的方法,得出三种排布序列。为验证该方法的可行性,采用风车形状作为超表面的结构单元,设计由 16×16 个单元组成的1-bit动态散射调控的编码超表面,并通过FPGA控制单元“0”和“1”之间的动态转换,实现超表面的波束调控。仿真结果表明,三种随机编码超表面将入射波有效地散射到四周,实现了RCS缩减的效果,且所设计的编码超表面缩减频段宽,缩减效果好。这项工作为天线隐身技术提供了新的方法,在未来多变的战场上具有巨大的潜力。

4 结论

本文所设计的编码超表面可有效实现RCS缩减,避免使用同一算法时因编码序列不同而产生的仿真误差,并且通过加载PIN二极管可更方便地实现编码序列的快速转换,有效克服了传统编码超表面结构固定功能单一的缺点。在今后的研究中,可继续对编码超表面的其他功能做进一步的讨论,使其具有更广泛的应用场景。

[参考文献]

- [1] CUI G, LIU Y, GONG S. A novel fractal patch antenna with low RCS [J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2007, 21 (15): 2403-2411. DOI: 10.1163/156939307783134335.
- [2] JIANG W, ZHANG Y, DENG Z B, et al. Novel technique for RCS reduction of circularly polarized microstrip antennas [J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2013, 27 (9): 1077-1088. DOI: 10.1080/09205071.2013.800461.
- [3] SUN S L, HE Q, XIAO S Y, et al. Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves [J]. *Nature Materials*, 2012, 11: 426-431. DOI: 10.1038/nmat3292.
- [4] LI G H, ZHAI H Q, LI L, et al. AMC-loaded wideband base station antenna for indoor access point in MIMO system [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63 (2): 525-533. DOI: 10.1109/TAP.2014.2378316.
- [5] DENG T W, LI Z W, CHEN Z N. Ultrathin broadband absorber using frequency-selective surface and frequency-dispersive magnetic materials [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65 (11): 5886-5894. DOI: 10.1109/TAP.2017.2748226.
- [6] YAN M B, QU S B, WANG J F, et al. A novel miniaturized frequency selective surface with stable resonance [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 13: 639-641. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2313067.
- [7] GHOSH S, SRIVASTAVA K V. Broadband polarization-insensitive tunable frequency selective surface for wideband shielding [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, 60(1): 166-172. DOI: 10.1109/TEMC.2017.2706359.
- [8] 何恺, 吕英华, 张金玲. 基于频率选择面低雷达散射截面的波导天线设计[J]. *电波科学学报*, 2016, 31 (2): 243-246. DOI: 10.13443/j.cjors.2015061102.
HE Kai, LYU Yinghua, ZHANG Jinling. The design of waveguide antenna with low radar cross section based on frequency selective surface [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2016, 31 (2): 243-246. DOI: 10.13443/j.cjors.2015061102.
- [9] 马于惠, 刘璐, 贾帅宇, 等. 一种采用吸波透波超表面的天线RCS宽带减缩新方法[J]. *电波科学学报*, 2022, 37 (3): 471-477. DOI: 10.12265/j.cjors.2021116.
MA Yuhui, LIU Lu, JIA Shuaiyu, et al. A novel method of antenna broadband radar cross section reduction by absorptive/transmissive metasurface [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2022, 37(3): 471-477. DOI: 10.12265/j.cjors.2021116.
- [10] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e218. DOI: 10.1038/lsa.2014.99.
- [11] 王向红, 谢红, 赵淑慧. 基于快速Kurtogram算法的中间介质随机共振信号特性分析[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 20(1): 104-111. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20211214012.
WANG Xianghong, XIE Hong, ZHAO Shuhui. Analysis of stochastic resonance signal characteristics of intermediate medium based on fast Kurtogram algorithm [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2023, 20 (1): 104-111. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20211214012.

- [12] PAZOKIAN M, KOMJANI N, KARIMIPOUR M. Broadband RCS reduction of microstrip antenna using coding frequency selective surface [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(8): 1382-1385. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2846613.
- [13] SU J X, KONG C Y, LI Z R, et al. Wideband diffuse scattering and RCS reduction of microstrip antenna array based on coding metasurface [J]. Electronics Letters, 2017, 53(16): 1088-1090. DOI: 10.1049/el.2017.1656.
- [14] 郝彪, 杨宾锋, 高军, 等. 一种编码式低雷达散射截面超表面天线阵列设计[J]. 物理学报, 2020, 69(24): 125-135. DOI: 10.7498/aps.69.20200978.
- HAO Biao, YANG Binfeng, GAO Jun, et al. A coding metasurface antenna array with low radar cross section [J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(24): 125-135. DOI: 10.7498/aps.69.20200978.
- [15] LIU X, GAO J, XU L M, et al. A coding diffuse metasurface for RCS reduction [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 16: 724-727. DOI: 10.1109/LAWP.2016.2601108.
- [16] 贾萌辉, 张晓卫, 陈新伟, 等. 具有雷达散射截面缩减特性的各向异性编码超表面[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2023, 46(5): 1111-1119. DOI: 10.13451/j.sxu.ns.2022077.
- JIA Menghui, ZHANG Xiaowei, CHEN Xinwei, et al. Anisotropic coding metasurface with radar cross section reduction [J]. Journal of Shaanxi University (Natural Science Edition), 2023, 46(5): 1111-1119. DOI: 10.13451/j.sxu.ns.2022077.
- [17] CHEN Y, HE X X, YANG Y, et al. Dynamic RCS reduction performances of antenna array with coding metasurface [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2022, 2022: 4644566. DOI: 10.1155/2022/4644566.
- [18] 周芹, 杜国宏, 孙筱枫, 等. 基于相位梯度的多波束超表面的RCS缩减研究[J]. 成都信息工程大学学报, 2020, 35(4): 419-423. DOI: 10.16836/j.cnki.jcuit.2020.04.009.
- ZHOU Qin, DU Guohong, SUN Xiaofeng, et al. Study of RCS reduction of multi-beam metasurface based on phase gradient [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2020, 35(4): 419-423. DOI: 10.16836/j.cnki.jcuit.2020.04.009.

(责任编辑 毛娜;校对 彭三军)