



可展收的新型超轻质角反射器设计

宗亚雳, 李帅鹏, 马昕宇, 杨癸庚, 弓明豪

Design of a novel ultra lightweight deployable corner reflector

ZONG Yali, LI Shuaipeng, MA Xinyu, YANG Guigeng, and GONG Minghao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.cjors.2023152>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

散射增强箔条雷达特性研究

Radar scattering characteristics of scattering enhanced chaff

电波科学学报. 2019, 34(6): 693–700

基于异常反射型超表面的天线反射面设计

Design of antenna reflector based on abnormal reflective metasurface

电波科学学报. 2018, 33(3): 337–342

基于谐振式反射器的UHF/S双频双定向蝶形天线

Resonance based reflector based UHF/S bow-tie antenna with two opposite uni-directional radiation bands

电波科学学报. 2017, 32(6): 742–750

均匀照射赋形反射面天线设计

The design of evened radiation reflector antenna

电波科学学报. 2020, 35(3): 358–363

基于组合梯度超表面的低RCS微带天线设计

Design of low RCS microstrip antenna based on combinatorial gradient metasurface

电波科学学报. 2018, 33(4): 441–446

一种新型高隔离四端口双工器设计

A novel design of 4-port diplexer with high isolation

电波科学学报. 2018, 33(2): 156–161



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

宗亚雳, 李帅鹏, 马昕宇, 等. 可展收的新型超轻质角反射器设计[J]. 电波科学学报, 2023, 38(6): 997-1006. DOI: 10.12265/j.cjors.2023152
ZONG Y L, LI S P, MA X Y, et al. Design of a novel ultra lightweight deployable corner reflector[J]. Chinese journal of radio science, 2023, 38(6): 997-1006.
(in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2023152

可展收的新型超轻质角反射器设计

宗亚雳¹ 李帅鹏^{1*} 马昕宇¹ 杨癸庚² 弓明豪³

(1. 西北工业大学, 西安 710129; 2. 西安理工大学, 西安 717048; 3. 西安电子科技大学, 西安 717017)

摘 要 雷达角反射器在雷达对抗领域中具有后发制人的作用, 能够干扰敌方雷达的探测, 保护己方重要设施. 传统角反射器多利用金属板材作为反射面制成, 虽具有强反射的功能, 但其质量较大, 一旦加工成型, 其形状和尺寸固定、散射特性单一, 因此, 逐渐不能满足日趋复杂的应用需求. 本文针对上述问题, 综合考虑角反射器的质量、散射特性及其可控性等, 提出了一种新型、超轻质、雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 可调的雷达角反射器结构设计方法. 该方法以高结构强度的碳纤维杆为支撑骨架, 以大柔性金属丝网为角反射器反射表面, 并进行结构展开-收拢功能设计, 使之可在不同结构状态间连续变化, 以实现 RCS 调控的目的. 为验证该设计方法的可行性与有效性, 研制了 1 m 口径 12 单元可展收角反射器阵列样机, 该新型雷达角反射器质量仅 1.325 kg, 并可顺利通过展收状态切换调控 RCS, 且便于其装载和运输, 适合多种载体平台使用. 经过实验测试验证, 其可实现 RCS 大幅调控, 在 2~20 GHz 频段内的多数频段可达 10 dBsm 以上的调控幅度, 在少数频段内幅度可超过 30 dBsm, 取得了良好的调控效果. 本文设计方法可为超轻质、散射特性可调的角反射器的设计提供参考.

关键词 角反射器; 超轻质; RCS 调控; 金属丝网反射面; 结构可变

中图分类号 TN974

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2023)06-0997-10

DOI 10.12265/j.cjors.2023152

Design of a novel ultra lightweight deployable corner reflector

ZONG Yali¹ LI Shuaipeng^{1*} MA Xinyu¹ YANG Guigeng² GONG Minghao³

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an 717048, China;
3. Xidian University, Xi'an 717017, China)

Abstract Radar corner reflector plays an role of post-strike in the field of radar countermeasures, which can interfere with the detection of enemy radar and protect important facilities of one's own side. The traditional corner reflector is made of metal plate as the reflecting surface. Although it has the function of strong reflection, its weight is larger. Once it is processed and formed, its shape and size are fixed and the scattering characteristics are single. Therefore, it cannot meet the increasingly complex application requirements. In order to solve the above problems, a design method of novel ultra-lightweight radar corner reflector structure with adjustable radar cross section (RCS) is proposed by considering the weight, scattering characteristics and adjustability of the corner reflector. The method uses carbon fiber rods with high structural strength as the supporting frame and large flexible wire mesh as the reflecting surface of the corner reflector. The structure is designed with the function of unwrapping folding, so that it can be continuously changed between different structural states, so as to achieve the purpose of RCS regulation. In order to verify the feasibility and effectiveness of the design method, a 1m aperture 12-unit deployable corner reflector array prototype was developed. The novel radar corner reflector has a weight of only 1.325 kg, and can regulate RCS smoothly through the deployable state switch, and is easy to be loaded and transported, which is suitable for a variety of carrier platforms. After experimental testing, it can achieve substantial regulation of RCS. More than 10 dBsm

收稿日期: 2023-05-30

资助项目: 国家自然科学基金 (51705423); 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2020JQ-188)

通信作者: 李帅鹏 E-mail: lisp0612@mail.nwpu.edu.cn

regulation amplitude can be reached for most frequency bands in the 2–20 GHz band, and it can exceed 30 dBsm for a few frequency bands, which proves that the regulation effect is good. This design method can provide reference for the design of ultra-lightweight corner reflectors with adjustable scattering characteristics.

Keywords corner reflector; ultra-lightweight; RCS regulation; wire mesh reflector; variable structure

0 引 言

随着当前电磁环境越来越复杂,电磁对抗发展越来越快,层出不穷的电磁对抗设备和工具改变了现代化战争的形式.在电磁对抗中,发挥关键作用的雷达角反射器就是一种有效的无源干扰设备,通过构成虚假目标以达到隐真示假的目的,进而保护重要战略装备^[1].此外,角反射器还能够为海上工作人员提供警示的作用,也可应用于地震形变的监测以提高形变监测的精度等方面^[2].同时,角反射器具有成本低、频带宽、全方位、使用方便、干扰持久、干扰效果明显等特点,与有源干扰设备相比,角反射器这类无源干扰不存在主动暴露的缺点,干扰手段也越来越多,技术日臻完善.

作为无源器件,角反射器的应用虽然广泛,但传统角反射器具有固定的尺寸、体积和较大的质量,其在结构加工完成之后便再难以根据电磁环境的变化而调节自身的散射特性,使用受限.文献[3]提出了一种新型角反射器,具有一定的空间优势,但牺牲了一定的俯仰角宽度,也无法实现散射特性的调控.文献[4]发明了一种可自由调节方位和俯仰的角反射器装置,但整体结构形式固定.在日渐复杂的应用需求下,兼顾上述散射特性可调和结构可变的问题日趋突出,对轻质量、运载过程中易于收纳、服役过程中雷达散射截面积(radar cross-section, RCS)可调的角反射器的需求日益迫切.

为解决上述问题,学者们基于角反射器^[5]和超材料技术^[6-18]等开展了丰富的研究.文献[5]从结构可变角度出发,设计了一种反射面叶片可旋转的角反射器,其中叶片旋转能够改变散射特性峰值的位置和方向图宽度,但缺点是每个叶片独立旋转均需要单独控制,系统复杂且结构尺寸固定.除此之外,还可以通过旋转角反射器达到散射特性调控效果^[7],从而可以通过其旋转对雷达的探测造成干扰.当角反射器做旋转或振动等微小运动时,雷达回波将产生独特的非线性相位调制效应,则目标图像将不再容易判断,如出现模糊和散焦等现象^[8].

结合超材料的迅速发展,应用超材料实现对雷达回波重要参数的精确调控技术得到了空前发展^[6].文献[9]设计了一种具有超材料吸波体的新型角反射器,能够实现不同频率下相似的 RCS 散射特性,从

而使雷达无法分辨目标.但其中的超材料吸波体安装要求较高,对位置精度比较敏感.

文献[10-12]提出了基于超材料的机械调控或电调控,实现了超宽带吸收器到反射器的功能切换.文献[10]通过折纸的伸缩实现了 6~16 GHz 内 10 dBsm 幅度的调控效果,但该方法的反射状态需要将表面积增大至吸波状态的 3 倍.文献[11]基于变容二极管的电容可变提出了一种 X 波段频带可调谐的超材料吸波,75% 的吸收带宽可以从 0.4 GHz 调谐到 0.74 GHz,但当应用于高频时,二极管准确性下降,该方法应用受限.有学者^[12]将水与低介电常数的材料混合,利用水在微波频率下具有频散介电常数的特性,所提出的超材料能够实现 6.2~19 GHz 宽频带吸收功能.此外,可通过改变环境温度来调节吸收带宽^[12],该方法通过温度加热进行控制,时效性不够高.引入数字编码的思想,文献[13]利用加法规则设计了一种 01 编码超表面,既减少了编码的个数,又能够实现灵活调控超表面的远场散射特性.

在雷达对抗领域中,散射缩减与增强均有不同的应用场景,可分别用来实现隐身与干扰.文献[14]提出了一种非对称开口圆环形结构的极化转换超表面,能够实现宽频带内 RCS 的缩减,实现隐身.而文献[15]提出的基于角反射器的箔条雷达散射特性增强方法能够实现单根箔条的 RCS 增大 30 dBsm 以上,实现干扰.虽然目标散射特性缩减与增强都能在对抗中发挥不同的作用,但散射特性调控的相关研究距落地应用还有一定的难度,若能够实现两种状态的随意切换,即实现调控,将会在雷达对抗中占据极大的优势.

综上所述,许多学者提出了新型角反射器和可调控的超材料,实现了特定频段内的散射调控,适用场景也各不相同.而角反射器因其独特的散射特性,通过精心设计,可实现宽频带和更大的散射特性调控幅度.但现有的一些雷达角反射器或阵列多以金属实体面为反射面,如图 1(a),当整体结构一经确定,其较大的质量和过大的体积都为装载、运输和使用带来了很大的困难^[16].少部分新型角反射器虽然具有散射特性调控的能力,但普遍具有复杂的结构和庞大的体积^[17],且调控范围很小^[18],很难满足对于散射特性的复杂多变要求.

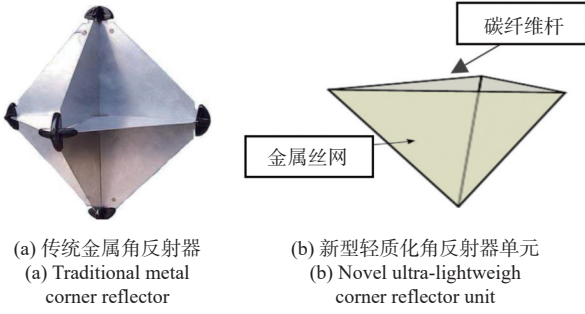


图 1 传统角反射器结构与超轻质角反射器结构对比

Fig. 1 Comparison between traditional and ultra-lightweight corner reflector structure

因此, 针对传统角反射器质量大、体积大、结构固定无法实现大幅度散射特性调控的问题, 本文提出了一种新型可展收轻质化雷达角反射器设计方法. 其可应用于海陆空等场景, 依据该方法设计的样机单元结构示意图如图 1(b) 所示. 本文分析了该角反射器单元及其组成阵列的电磁散射特性, 提出了 RCS 调控方案. 最后对调控效果进行了实验验证, 结果表明该新型角反射器阵列具有轻质化和散射特性大幅度可调的特点.

1 角反射器 RCS 分析方法与验证

1.1 RCS 含义

RCS 是衡量目标散射雷达波能力的重要指标, 其大小依赖于目标的几何形状、朝向、目标材料等, 同时也和入射波的频率与极化形式等有关^[19]. 一般而言, 目标的 RCS 可按雷达发射机和接收机是否处于同一位置而分为单站 RCS 和双站 RCS.

RCS 能够反映目标在雷达接收方向反射电磁波的能力, 即在单位立体角下, 其大小可表示为目标的散射功率密度与目标在雷达接收方向上的入射功率密度之比, 如式 (1) 所示:

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_r|^2}{|E_i|^2} \quad (1)$$

式中: σ 表示目标的 RCS, m^2 ; r 表示目标至雷达之间的距离, m ; E_r 表示散射波的电场强度, V/m ; E_i 表示入射波的电场强度, V/m .

在式 (1) 中, $|E_r|^2$ 反比于 r^2 , 入射波电场 E_i 取决于雷达发射机的特性. 随着距离 r 的增加, 由目标反射产生的电场 E_r 同步减小, 因此, 目标 RCS 不随距离 r 变化而变化^[19].

通常, RCS 的单位为 $\text{dB}(\text{dBsm})$ 或 m^2 , 其转换关系为

$$\sigma(\text{dB}) = 10\lg(\sigma(\text{m}^2)) \quad (2)$$

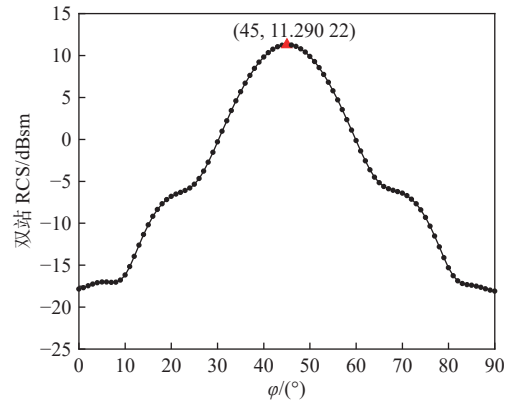
有关目标 RCS 求解的方法很多, 如早期的经典

解法: 几何绕射理论、物理光学法、弹跳射线法和物理绕射理论等; 之后随着硬件计算性能的提高, 又出现了诸如有限元法 (finite element method, FEM)、时域有限差分法和矩量法的全波数值分析方法; 后续又出现了快速多极子方法等快速算法^[20]. 本文基于全波分析法进行 RCS 计算, 由于本文重点不在目标 RCS 的计算方法上, 故不在此展开.

1.2 角反射器单元 RCS 分析方法

本文采用 FEM 进行角反射器单元的 RCS 计算, 为验证仿真计算方法的正确性, 将计算结果与理论计算 (等效截面法)^[21] 进行了对比分析.

基于 FEM 的全波频域电磁场求解器 HFSS 软件可用来计算雷达角反射器的散射特性. HFSS 软件能够将计算域剖分成有限个不重叠的单元, 并结合对应的边界条件进行计算. 在确定雷达角反射器的尺寸和工作频率后, 便可采用该求解器对其 RCS 进行计算. 对于口径面边长为 500 mm 的角反射器单元, 采用 FEM 求解后, 得到 4 GHz 下角反射器单元双站 RCS 结果如图 2 所示.

图 2 4 GHz 角反射器单元双站 RCS 仿真结果 (入射波角度为 $\theta=58^\circ$, $\varphi=45^\circ$)Fig. 2 Simulation results of bistatic RCS of 4 GHz corner reflector unit (incident wave direction: $\theta=58^\circ$, $\varphi=45^\circ$)

采用等效截面法的理论公式进行关键入射角处的 RCS 计算时, 将角反射器单元置于如图 3 所示坐标系中, 入射波的俯仰角和方位角分别为 θ 、 φ , 则雷达方向的单位矢量 $\mathbf{r} = (r_x, r_y, r_z)$ 可表示为^[21]

$$\begin{cases} r_x = \sin \theta \cos \varphi \\ r_y = \sin \theta \sin \varphi \\ r_z = \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

因此, 根据文献 [21], 目标的 RCS 可由式 (4) 表示:

$$\sigma = \frac{4\pi S_{\text{eff}}^2}{\lambda^2} \quad (4)$$

式中, S_{eff} 表示等效散射截面积,

$$S_{\text{eff}} = \begin{cases} \left(l+m+n-\frac{2}{l+m+n}\right)a^2 & l+m \geq n \\ \frac{4lm}{l+m+n}a^2 & l+m < n \end{cases} \quad (5)$$

a 是角反射器单元的棱长,取 353.55 mm, l 、 m 和 n 满足

$$\begin{cases} l = \min\{r_x, r_y, r_z\} \\ m = \text{mid}\{r_x, r_y, r_z\} \\ n = \max\{r_x, r_y, r_z\} \end{cases} \quad (6)$$

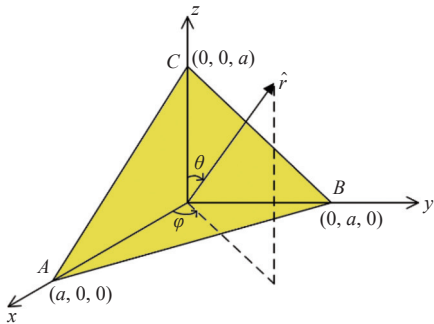


图 3 角反射器单元位置坐标示意图

Fig. 3 Corner reflector unit position coordinate

利用等效截面法与 HFSS 有限元全波分析方法求解的 4 GHz 时散射特性对比如表 1 所示.

表 1 不同方法获得的最大 RCS 及其相应的入射波方向

Tab. 1 Maximum RCS obtained by different methods and their corresponding incident wave directions

计算方法	最大RCS/dBsm	入射波方向
FEM	11.290 2	$\theta = 58^\circ, \varphi = 45^\circ$
理论计算(等效截面法)	10.66	$\theta = 56^\circ, \varphi = 46^\circ$

据表 1 所得结果可知,对于雷达角反射器单元,利用 FEM 和等效截面法所得到的最大 RCS 非常接近,误差仅 0.630 2 dBsm,且此时的入射波方向也非常接近.由此可见,本文基于 FEM 计算的正确性能够被等效截面法验证.同时,也可以看出雷达角反射器能够形成对来波的强反射,可为后续角反射器阵列和散射特性调控的相关研究做铺垫.

1.3 轻质化设计

由于传统角反射器大都由金属板拼接而成,其本身的质量为角反射器的装载、运输和使用带来了麻烦.因此,为了满足更高的功能需求,本文提出了新型角反射器,可极大地减轻结构质量,从支撑结构、反射面和连接关节结构等方面出发,创新性地提出了轻质化设计方案,同时还能够满足该新型角反射器的散射特性可调控的功能特性.

1.3.1 轻质化反射面

为减轻角反射器质量,本文以金属丝网代替传

统的金属反射面.金属丝网通常有镀金钼丝、镀金镍丝和不锈钢丝等,丝径可低至 0.025 4 mm^[22],网孔形状常见的有图 4 所示的方形和三角形等形式.表 2 给出了反射面为不同金属材质、厚度为 0.025 4 mm 时,与不同类型金属丝网的质量对比情况.

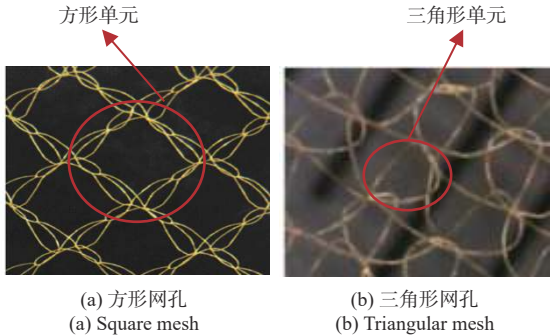


图 4 丝网结构常见的两种单元形式
Fig. 4 Two common cell forms of mesh structure

表 2 不同材料和类型的反射面质量对比

Tab. 2 Comparison of reflective surface weights of different materials and types

反射面类型	材料种类	材料密度/ (g·cm ⁻³)	质量/ (10 ⁻³ g·(25 mm ²) ⁻¹)	质量比
方形单元网状反射面	镀金	10.29	0.16	1
三角单元网状反射面	钼丝	10.29	0.07	0.4
实体金属反射面	钼	10.29	6.53	41
	铜	8.96	5.69	36
	钢	7.85	4.98	32
	铝合金	2.82	1.79	11

从表 2 可以看出,由钼金属做成的实体反射面最重,而具有三角单元的网状反射面最轻,具有方形单元的网状反射面稍重于三角单元的网状反射面.在实体反射面中,由铝合金做成的实体反射面最轻,但其质量仍约是具有方形单元的网状反射面质量的 11 倍、具有三角单元的网状反射面质量的 26 倍.以上结果表明,网状反射面在新型轻质化雷达角反射器中的应用非常具有潜力,对于大规模的阵列,其优势更加显著.

对于金属丝网的电性能,不同于传统角反射器的金属板反射面,所提出的新型角反射器反射面由金属丝网构成,当满足一定条件后,金属丝网可等效成实体反射面.文献 [23] 根据网孔形状、网孔单元长度 l 与工作波长 λ 的关系提出了等效条件:当网孔是方形且满足 $l \leq 0.05\lambda$,或网孔是三角形且 $l \leq 0.08\lambda$ 时,丝网反射面和实体反射面在电性能方面的差距非常小,可将丝网反射面等效成实体反射面.相比于实体反射面,金属丝网具有两个其不可比拟的优势:一方面是极轻的质量优势;一方面具有柔性可折叠的特

性.其可为后续角反射器的展收设计做铺垫.在对加工精度、成本和电性能特性等方面综合考虑后,本文选取了0.05 mm的不锈钢丝编织的金属反射丝网,网孔形状为方形,网孔直径为5 mm,将金属丝网用专用粘贴剂贴附到角反射器骨架上,制作了口径面边长为0.5 m的角反射器单元样件,以验证方案的可行性.

1.3.2 轻质化骨架

相比于传统金属结构,碳纤维杆在能够满足极大减轻质量的条件下还能提供较高的结构强度,也具有耐腐蚀、抗老化、抗冲击和组装方便等特点.同时,碳纤维杆加工成本较低,因此,它成为了该新型角反射器支撑结构的不二之选.对于本文设计的0.5 m雷达角反射器样件,其支撑骨架结构,包括图5所示的支撑杆和上弦杆,均采用了直径为5 mm的碳纤维杆.

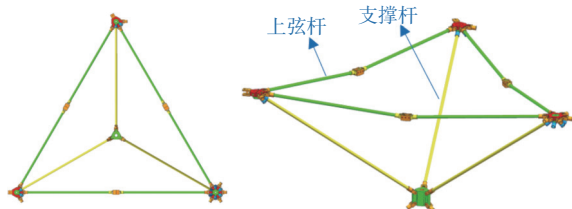


图5 轻质化支撑骨架

Fig. 5 Lightweight support frame

1.3.3 轻质化连接关节

为了实现骨架支撑作用和可折叠展收功能,碳纤维杆之间需要依靠特定的关节结构连接.本文0.5 m口径面边长的角反射器样件,关节结构选择了结构强度较大、密度较小的铝镁合金材料,其可实现碳纤维杆之间的连接和展收功能.

为了避免上弦杆展开时处于死点,上弦杆之间的展开关节会控制两端的上弦杆之间留有一定的角度.由于编织而成的金属丝网具有一定的弹性,在碳纤维杆支撑骨架展开收拢时,金属丝网反射面也会跟着展开和收缩.

将轻质化反射面、骨架与连接关节装配,得到该新型角反射器单元装配实物图如图6所示.

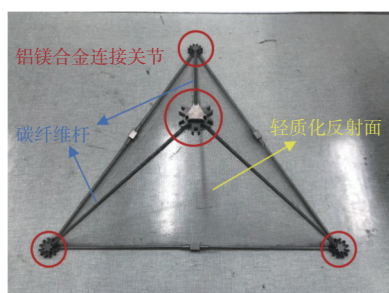


图6 角反射器单元装配实物图

Fig. 6 Picture of corner reflector unit assembly

2 可展开-收拢角反射器阵列设计

由于单个0.5 m口径面边长的雷达角反射器对RCS调控的范围有限,无法满足工程实践中对大幅调控的需求,本文将以前提出的新型雷达角反射器为基础,给出角反射器阵列的构型设计方案,同时给出新型雷达角反射器阵列通过自身状态的改变而实现散射特性调控的方案.

2.1 角反射器阵列设计

令三角形三面角反射器的口径面为正三角形,将角反射器单元围绕口径面的一个点旋转,得到由6个单元组成的正六边形形式的单层角反射器阵列,为提高角反射器阵列在更大空间范围内的散射能力,该方案将角反射器阵列设计为对称的两层角反射器阵列,且两层角反射器阵列的口径面朝向相反,如图7所示.

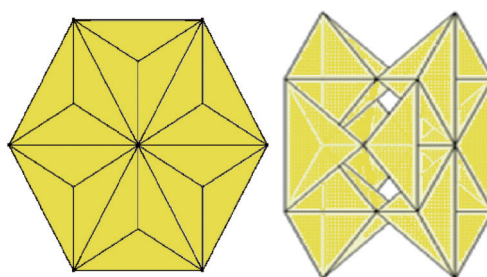


图7 新型雷达角反射器阵列的构型示意图

Fig. 7 The configuration of the novel radar corner reflector array

在确定好角反射器阵列的构型后,设计碳纤维杆和连接关节组成阵列的结构骨架作为支撑结构,如图8所示.

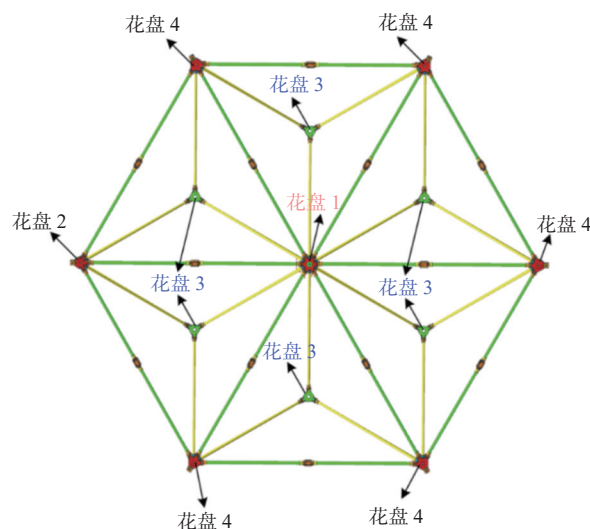


图8 新型角反射器阵列支撑结构装配图俯视图

Fig. 8 Top view of assembly drawing of novel corner reflector array support structure

加工装配后的 1 m 口径 12 单元的角反射器阵列实物如图 9 所示,整体质量仅有 1.325 kg.

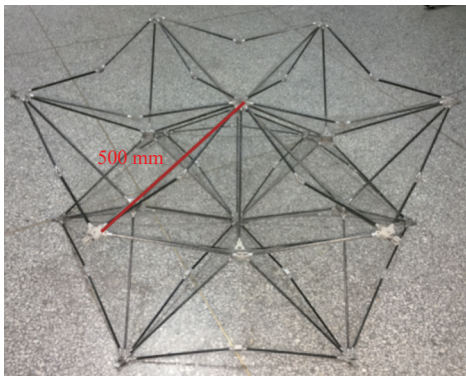


图 9 新型可展开-收拢的轻质化角反射器阵列实物
Fig. 9 The novel type of lightweight corner reflector array with unwrapping and folding function

该新型雷达角反射器阵列的结构指标如表 3 所示.

表 3 本文设计的轻质化角反射器阵列结构指标
Tab. 3 The design of lightweight corner reflector array structure index in this paper

指标参数	取值
铺网前总质量	1.220 kg
铺网后总质量	1.325 kg
收拢体积	0.004 m ³
收拢高度	0.8 m
收拢直径	0.04 m
展开高度	0.414 m
展开体积	0.325 m ³
收纳率	81.25%

由表 3 不难看出,本文设计的角反射器阵列在轻质化方面具有突出的优势,体密度仅为 2.498×10^{-9} kg/mm³,而金属丝网作为反射面仅占据整体质量的 7.92%;此外,其展开体积为 0.325 m³,收拢体积仅有 0.004 m³,收纳率高达 81.25%.极致的轻量化设计和形态可切换功能为该新型雷达角反射器的创新设计和应用提供了极大的优势和参考价值.

2.2 基于结构展开-收拢的调控方法

在提出的新型雷达角反射器阵列实现极致轻量化的基础上,本节将对阵列可展开-收拢设计进行阐述,主要包括调控原理、调控方案和调控效果三个方面.

2.2.1 调控原理

所提出的雷达角反射器阵列通过展现出不同的结构形态实现对 RCS 的调控.得益于角反射器阵列的可展开-收拢功能,其不同的结构形态可依靠口径面的展开程度或两向接头所连接的两个上弦杆组成的角度确定,不同的展开程度对来波的散射情况不

同.使用步进电机驱动角反射器阵列完成展开-收拢的动作,且可使其处于任意中间形态,不同结构形态具有对电磁波不同的散射特性.因此,控制角反射器阵列的结构形态得到对应不同的 RCS,以此关系实现对 RCS 的调控.此外,角反射器阵列的轻质化设计也为形态的切换提供了便利.

2.2.2 调控方案

角反射器阵列的反射面均为具有弹性的金属丝网,当阵列在不同结构形态间切换时,金属丝网均能够保持反射面平整状态,从而减小了杂乱的丝网对电磁波的散射.碳纤维杆在不同结构的连接关节的连接作用下形成了整体阵列的支撑结构,如图 10 所示.当阵列在展收过程中,支撑杆以花盘 3 为中心进行旋转,其旋转角度决定了阵列的展开程度;每两个上弦杆之间利用花盘或两向接头连接,其中,上弦杆在两向接头的连接下能够完成折叠动作,该动作能够使角反射器阵列进行展开或收拢;两向接头中安装有弹簧结构,确保了金属丝网反射面在阵列完全展开状态下能够保持平整状态.

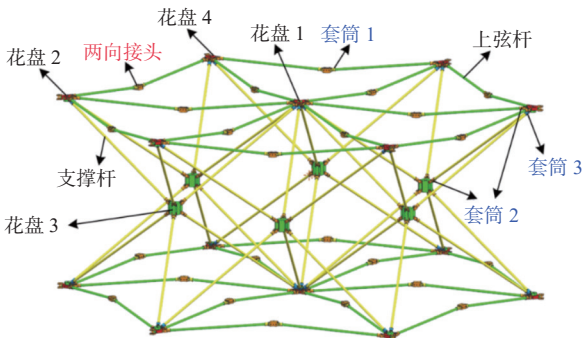


图 10 新型雷达角反射器阵列结构示意图
Fig. 10 Schematic of the novel radar corner reflector array

欲实现上述结构的展开收拢,需要步进电机进行驱动.角反射器阵列上下两端的花盘结构均留有位置以供电机绳穿装.由于本文所提出的角反射器阵列自身的结构能够使得其在展开和收拢过程中切换任意结构形态,因此,步进电机可通过对金属细绳的驱动,进而达到对角反射器阵列的间接驱动,可分为展开和收拢两个过程.

收拢过程:在步进电机的驱动作用下,金属细绳收紧拉伸,迫使角反射器阵列收拢,而金属丝网随之收拢,阵列口径面减小,阵列 RCS 也随之减小.

展开过程:步进电机释放电机驱动绳,角反射器阵列在自身重力和两向接头内部弹簧的作用下进行展开,金属丝网也随之逐渐展开形成平整反射面,阵列口径面增大,阵列 RCS 也随之增大.

为防止电机启停时的冲击作用,研究对步进电机的正转与反转速度规划,结果如图 11 曲线所示,

由于电机配套有可编程运动控制器,既能够控制电机转速,又能够控制电机转向,因此,该速度规划曲线可以根据需求而改变.控制电机绳的拉伸程度,以此控制阵列口径面的展开程度,从而可以得到展开到收拢过程(或逆过程)中的任意结构形态,相应地也能得到任意大小的阵列口径面.因此,依据角反射器阵列不同的展开程度,形成对 RCS 的调控.

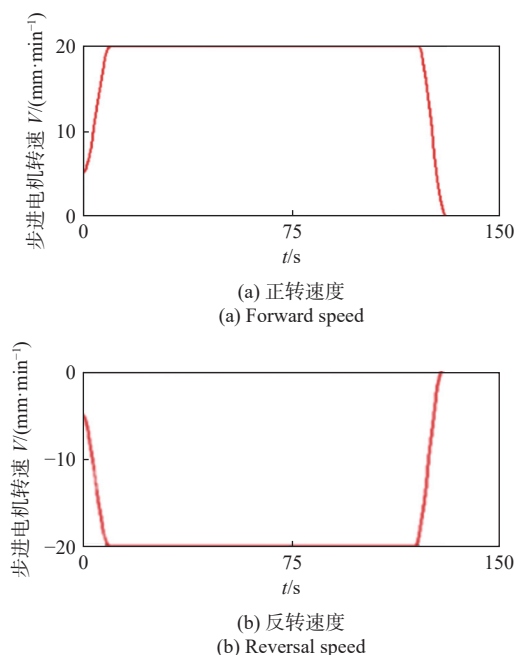


图 11 步进电机转速规划曲线

Fig. 11 Stepper motor speed planning curve

2.2.3 调控效果

将新型雷达角反射器阵列实物装载到实验机架上,机架起到支撑整个角反射器阵列的作用,如图 12 所示,在步进电机的驱动控制下,角反射器阵列能够按给定模式进行展开和收拢动作,在给定设置好的电机驱动参数后,整个角反射器阵列能够顺利地展开和收拢.

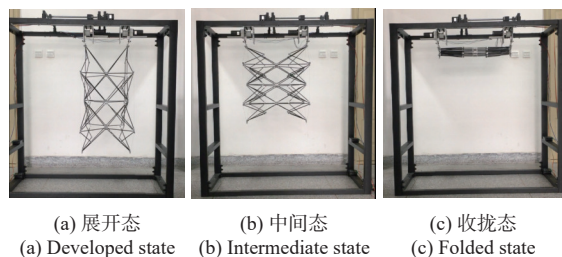


图 12 新型角反射器阵列的三种结构状态

Fig. 12 Three structural states of the novel corner reflector array

2.3 RCS 调控性能测试

为了验证该新型角反射器阵列展开收拢的结构变化对 RCS 的效果,本文采用时域超宽带 RCS 测量

方法对上述 1 m 口径 12 单元的角反射器阵列的实验测试,其原理如图 13 所示.

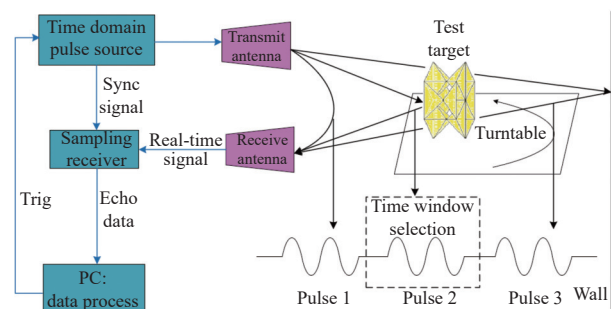


图 13 时域超宽带 RCS 测量系统

Fig. 13 Time-domain ultra-wideband RCS measurement system

在步进电机驱动下,可以看出,该角反射器阵列能够稳定地维持不同的展开收拢程度(不同状态),以此作为散射特性调控的结构基础.下面将会给出四种不同结构状态下的 RCS 随入射波频率变化的关系,并给出实验测试的分析.

分别记展开状态与收拢状态为状态 1 与状态 2,并给出两种中间状态 a 和 b(以角反射器阵列的两向接头所连接的上弦杆之间的夹角分别为 135° 和 90° 区分中间状态 a 和 b),如图 14 所示,实测结果如图 15~17 所示.

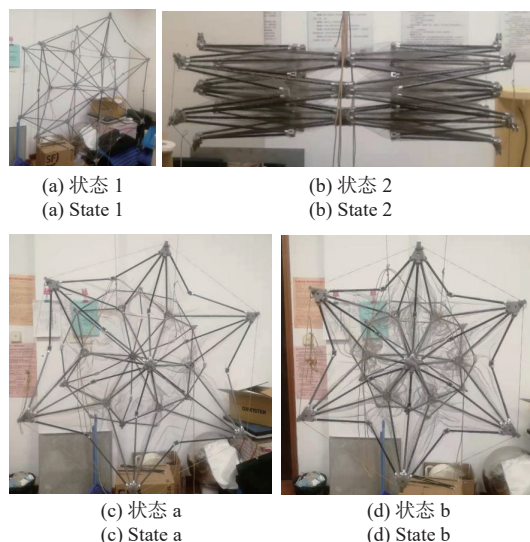


图 14 新型角反射器阵列展开与收拢状态及中间状态图

Fig. 14 Unwrapping, folding state and intermediate state picture of the novel corner reflector array

由图 15 可以看出:在状态 1 下,阵列为展开状态,主要呈现出增强反射的特性,多数频点的 RCS 值大于 10 dBsm,说明能够实现增强反射的基础功能;在状态 2 下,阵列收拢,口径减小,在绝大多数频率下具有较低 RCS.对比两种状态下的 RCS 曲线,其差值在一些频点处高达 30 dBsm.两种状态的

RCS 测试曲线的结果能够初步验证状态切换可以实现散射特性调控的功能,即通过在状态 1 和 2 之间切换,改变角反射器阵列的口径大小以改变其反射强度,从而调整 RCS,实现对来波的调控,且调控幅度较大。

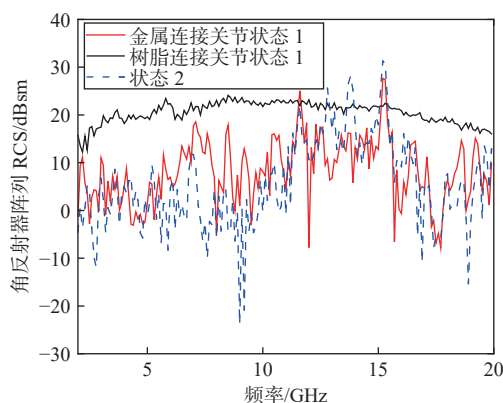


图 15 角反射器阵列状态 1 和 2 的散射特性

Fig. 15 Scattering characteristics of corner reflector array in states 1 and 2

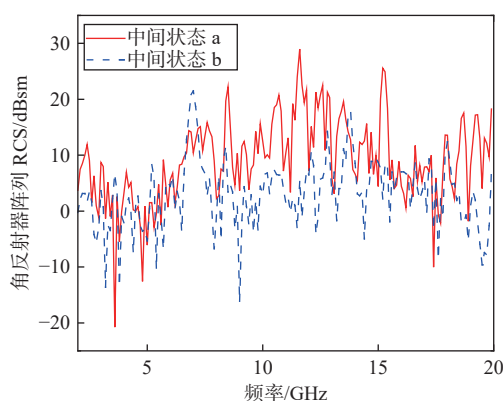


图 16 角反射器阵列中间状态 a 和 b 的散射特性

Fig. 16 Scattering characteristics of corner reflector array in intermediate state a and b

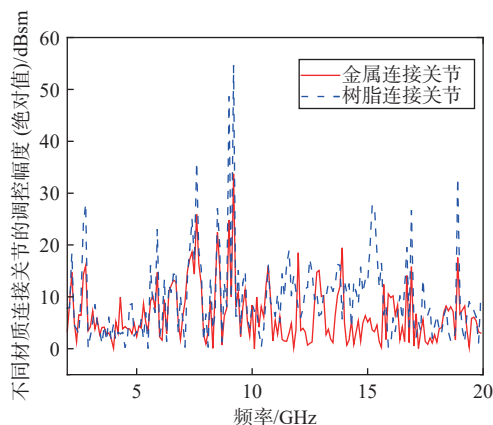


图 17 不同材质连接关节的调控幅度对比

Fig. 17 Comparison of control amplitude of joint with different materials

由图 16 可以看出:由状态 a 到状态 b 的结构变换后,角反射器阵列的口径减小,且后者状态的大部分频点下阵列 RCS 减小;相比于状态 a,除部分频点外,状态 b 下具有更低的 RCS。因此,在电机驱动下,角反射器阵列口径可以实现变化。从状态 1 到状态 a、b,再到状态 2,阵列口径减小,RCS 更低;反过来,RCS 增大;或从中间状态无规律地展开或收拢,实现对散射特性的控制。

由于该新型角反射器阵列的连接关节为金属材料,降低了后向散射,导致图 15 中其调控效果在有些频段不显著。故本文另设计一款采用树脂材质连接关节的处于展开状态的同尺寸角反射器阵列,以降低金属连接关节对散射的影响,其测试结果如图 15 所示,可以看出,更换树脂材质连接关节后,调控效果得到明显改善,角反射器阵列整体 RCS 有所提高,结合图 17 的调控幅度(绝对值)曲线,还可以看出,树脂连接关节的阵列在绝大多数频段内具有 10 dBsm 以上的调控幅度,在 7.6、9、18.9 GHz 附近频段内能够达到 30 dBsm 及以上,且整体而言,树脂连接关节的角反射器阵列具有普遍的高调控幅度。因此,此后的研究中可采用树脂或其他非金属新型材料作为连接关节降低后向散射,以提高新型角反射器阵列的调控效果。

3 总 结

本文提出了一种新型雷达角反射器阵列设计方法,可实现超轻质化、可展收、对 RCS 可大幅调控的特性。

在轻质化设计方面,本文创新性地使用了金属丝网替代传统角反射器的实体反射面,在不大幅增加电磁损耗的情况下极大地减小了质量;角反射器骨架采用了轻质高结构强度的碳纤维杆,碳纤维杆之间依靠特制的合金关节结构连接,既保证了轻量化的设计,又能够为角反射器阵列的展开收拢创造条件。经过实际测试,本文所提出的 12 单元角反射器阵列的整体质量低至 1.325 kg,非常有利于该角反射器阵列的装载运输和使用,其应用场景包括海上、陆地和空中。此外,轻量化的设计也为散射特性可控的设计带来了便利。

得益于对阵列结构巧妙的展开-收拢方案设计,该角反射器阵列能够在步进电机的驱动控制下,实现自身结构形态的变换。当步进电机处于不同的驱动控制模式下,该角反射器阵列能够变换到对应展开程度的状态,从而形成该状态下的散射特性。因此,新型雷达角反射器阵列实现了传统角反射器无法实现的可变体积操作,一方面有利于运输和装载,

更重要的是,能够根据要求而展现出不同的展开态,实现目标散射特性的调控.实验测试表明,RCS可控范围高达 30 dBsm,且具有较大的调控范围.除此之外,该角反射器阵列也能够用于干扰雷达探测.当阵列进行频繁无规律的展开收拢操作时,雷达所探测到的目标呈现出无规律变化的 RCS 的情况,从而无法确定目标特性.

需要指出的是,本文尚未开展制造误差等因素对该新型角反射器阵列散射性能的影响分析,但该影响是不可避免的,因此不可忽略不计.后续将研究制造误差等因素的影响机理与分析、评估方法,以更准确地掌握误差因素对散射性能的影响规律,促进设计水平提升.

参考文献

- [1] 张志远,张介秋,屈绍波,等.雷达角反射器的研究进展及展望[J]. *飞航导弹*, 2014(4): 64-70.
ZHANG Z Y, ZHANG J Q, QU S B, et al. Research progress and prospect of radar corner reflector[J]. *Aerodynamic missile journal*, 2014(4): 64-70.
- [2] 赵俊娟,尹京苑,李成范,等.地震形变监测中人工角反射器的应用[J]. *灾害学*, 2013, 28(4): 34-39.
ZHAO J J, YIN J Y, LI C F, et al. Application of artificial corner reflector in earthquake deformation monitoring[J]. *Journal of catastrophology*, 2013, 28(4): 34-39. (in Chinese)
- [3] 陈垦,唐勇,周勇.一种角反射器:中国,217278904U[P], 2022-08-23.
- [4] 李吉平,袁健超,徐康,等.一种可自由调节方向的角反射器装置:中国,217689377U[P], 2022-10-28.
- [5] 李有才,郑春弟,黄强.旋转式RCS可变角反射器的结构设计及可行性研究[J]. *舰船电子对抗*, 2011, 34(3): 106-109+120.
LI Y C, ZHENG C D, HUANG Q. Structural design and feasibility study of rotary corner with variable RCS[J]. *Shipboard electronic countermeasure*, 2011, 34(3): 106-109+120. (in Chinese)
- [6] 冯德军,谢前朋,王俊杰,等.对雷达回波的无源电磁调控技术及其发展[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(6): 1236-1241.
FENG D J, XIE Q M, WANG J J, et al. Passive electromagnetic manipulation technology to radar echo and its development[J]. *Systems engineering and electronics*, 2019, 41(6): 1236-1241. (in Chinese)
- [7] 宗亚雳,李帅鹏,李长侑,等.一种RCS旋转可调的轻型反射器及其调控方法:中国,113945895A[P], 2022-01-18.
- [8] 韩国强,马孝尊,邢世其,等.对SAR微动调制干扰效果仿真分析[J]. *现代防御技术*, 2013, 41(1): 176-182.
HAN G Q, MA X Z, XING S Q, et al. Simulation and analysis of micro motion modulation jamming on SAR[J]. *Modern defence technology*, 2013, 41(1): 176-182. (in Chinese)
- [9] 祝寄徐,裴志斌,屈绍波,等.一种加载超材料吸波体的新型三面角反射器设计[J]. *电子元件与材料*, 2013, 32(10): 52-54+58.
ZHU J X, PEI Z B, QU S B, et al. Design of novel trihedral corner reflector loaded with meta-material absorbing body[J]. *Electronic components and materials*, 2013, 32(10): 52-54+58. (in Chinese)
- [10] PHAM T L, XUAN K B, TUNG B S, et al. Origami-based stretchable bi-functional metamaterials: reflector and broadband absorber[J]. *Journal of physics D:applied physics*, 2021, 54(16): 165111.
- [11] YUAN H, ZHU B O, FENG Y. A frequency and bandwidth tunable metamaterial absorber in x-band[J]. *Journal of applied physics*, 2015, 117(17): 173103.
- [12] PANG Y Q, WANG J F, CHENG Q, et al. Thermally tunable water-substrate broadband metamaterial absorbers[J]. *Applied physics letters*, 2017, 110(10): 104103.
- [13] 郝宏刚,张婷,李江,等.编码超表面远场散射波束调控设计[J]. *电波科学学报*, 2020, 35(3): 437-442.
HAO H G, ZHANG T, LI J, et al. Beam steering design of far-field scattering based on coding metasurface[J]. *Chinese journal of radio science*, 2020, 35(3): 437-442. (in Chinese)
- [14] 舒元亮,张云华,朱国强,等.基于极化旋转单元的宽带雷达散射截面缩减[J]. *电波科学学报*, 2019, 34(1): 126-132.
SHU Y L, ZHANG Y H, ZHU G Q, et al. Wideband RCS reduction based on polarization conversion unit cell[J]. *Chinese journal of radio science*, 2019, 34(1): 126-132. (in Chinese)
- [15] 刘鑫,艾夏,刘佳琪,等.散射增强箔条雷达特性研究[J]. *电波科学学报*, 2019, 34(6): 693-700.
LIU X, AI X, LIU J Q, et al. Radar scattering characteristics of scattering enhanced chaff[J]. *Chinese journal of radio science*, 2019, 34(6): 693-700. (in Chinese)
- [16] 韩笑生,任要,朱超颖.一种模拟潜艇水面工况的角反射器阵列装置:中国,115642406A[P], 2023-01-24.
- [17] 刘永强,孙金海,李粮生,等.超表面透镜角反射器:中国,111981438A[P], 2020-11-24.
- [18] 林艳生,李首才,赵旭阳,等.一种角反射器:中国,212134932U[P], 2020-12-11.
- [19] CHENG D K. *Field and wave electromagnetics*[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [20] 刘良.雷达宽角无源反射器的研究与设计[D].南昌:南昌航空大学, 2014.

- LIU L. Research and design for radar passive reflector of wide-angle [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2014. (in Chinese)
- [21] 闫华, 李胜, 殷红成. 非等边三面角反射器RCS的解析表达与有效散射区域分析[J]. [中国传媒大学学报\(自然科学版\)](#), 2019, 26(1): 5-14.
- YAN H, LI S, YIN H C. An analytic representation of the scalene trihedral corner reflector's RCS and analysis of effective scattering zone[J]. [Journal of Communication University of China \(natural science edition\)](#), 2019, 26(1): 5-14. (in Chinese)
- [22] RAHMAT-SAMII Y, MANOHAR V, KOVITZ J M, et al. Development of highly constrained 1 m Ka-band mesh deployable offset reflector antenna for next generation CubeSat radars[J]. [IEEE transactions on antennas and propagation](#), 2019, 67(10): 6254-6266.
- [23] 杜立贺. 基于丝网等效的网状反射面天线电性能分析与软件开发[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- DU L H. Development of software and electrical perform-

ance analysis of mesh reflector antenna based on equivalent of mesh [D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)

作者简介

宗亚雳 (1988—), 女, 河南人, 西北工业大学电子信息学院副教授, 博士, 研究方向为相控阵/反射面天线多学科综合分析与优化设计、智能蒙皮材料吸波特性研究及复杂目标散射性能研究. E-mail: zongyali@nwpu.edu.cn

李帅鹏 (1998—), 男, 河南人, 西北工业大学电子信息学院硕士研究生, 研究方向为复杂目标散射特性设计. E-mail: lisp0612@mail.nwpu.edu.cn

马昕宇 (1998—), 男, 陕西人, 西北工业大学电子信息学院博士研究生, 研究方向为超材料电磁波调控设计. E-mail: XinyuMa@mail.nwpu.edu.cn