

基于特征模理论的共形阵列天线散射对消设计

梁梓宣, 贾 丹, 刘亚昆, 张紫琛

(中国电子科技集团公司 第 54 研究所, 石家庄 050081)

摘要: 针对共形阵列天线的散射对消设计进行研究, 基于特征模理论指导对共形微带天线单元的辐射和散射进行特征模式分析, 设计了一种加载寄生贴片的新型微带天线结构, 实现了对共形单元辐射和散射模式的独立调控; 在保证辐射模式不变基础上, 通过调节寄生贴片枝节长度调控共形单元的散射模式相位, 使参考单元和设计单元的散射模式电流方向相反, 将其组成 4×4 共形阵列天线, 通过两种单元的散射模式对消实现 RCS 缩减; 仿真结果表明, 在工作频段 5.09~5.89 GHz 内, 设计共形阵列天线增益下降小于 0.1 dB, 在 4~8 GHz 频带内实现了 RCS 缩减, 带内 x 极化 RCS 缩减均值为 19.4 dB, 缩减峰值达 21.8 dB; 与传统平面微带阵列天线散射对消设计方法相比, 采用特征模理论进行共形阵列天线散射对消设计综合了共形单元散射模式相位及空间相差引入的相位, 为准确指导共形阵列天线散射对消设计提供了新的设计方法。

关键词: 雷达散射截面缩减; 共形阵列天线; 散射对消; 微带天线; 特征模理论

Design of Scattering-cancellation Conformal Array Antenna
Based on Characteristic Mode Theory

LIANG Zixuan, JIA Dan, LIU Yakun, ZHANG Zichen

(The 54th Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: A study is conducted on the design of scattering cancellation for conformal array antennas, and based on characteristic mode theory, the radiation and scattering modes of conformal microstrip antennas are analyzed. A novel microstrip antenna structure loaded with parasitic patches is designed, which independently regulates the radiation and scattering modes of the conformal cell. while ensuring the radiation pattern remains unchanged, the scattering pattern phase of the conformal unit is regulated by adjusting the length of the parasitic patch branches, so that the scattering pattern currents of the reference unit and the design unit are in the opposite direction. The reference cell and designed cell are combined into a 4×4 conformal array antenna, which realizes RCS reduction through the scattering cancellation of two types of cells. Simulation results show that the proposed conformal array reduces the gain by less than 0.1 dB in the operating band of 5.09~5.89 GHz, and the RCS reduction is achieved in the band of 4~8 GHz. The mean value of RCS reduction of in-band x-polarization is 19.4 dB, and the peak value of RCS reduction reaches up to 21.8 dB. Compared with the traditional scattering cancellation methods in planar microstrip array antennas, the scattering cancellation method for conformal array antennas based on characteristic mode theory integrates the scattering mode phase and spatial phase differences of conformal units, which provided a new design for accurately guiding conformal array antennas.

Keywords: RCS reduction; conformal array antenna; scattering cancellation; microstrip antenna; characteristic mode theory

0 引言

随着信息化战争的深入发展, 具有低可探测特性的武器装备系统研制成为各国重点关注的研究领域^[1]。天

线是无线通信系统中收发信号的重要器件, 载体平台本身的隐身性能不断提升, 天线的雷达散射截面 (RCS, radar cross section) 逐渐成为低可探测平台无法忽视的散射源^[2], 因此, 降低天线的 RCS 迫在眉睫。将传统

收稿日期:2024-11-16; 修回日期:2024-12-17。

作者简介:梁梓宣(1997-),男,硕士研究生。

通讯作者:贾 丹(1987-),女,博士,高级工程师。

引用格式:梁梓宣,贾 丹,刘亚昆,等. 基于特征模理论的共形阵列天线散射对消设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(2): 308-316.

平面阵列天线设计为共形阵列可提升天线的隐身性能,且共形天线相比于传统天线可以在空间有限的情况下改善平面相控阵天线扫描范围受限的问题^[3],共形阵列天线及其带内隐身设计成为当前的研究热点。

在天线的隐身设计中,常用于缩减天线 RCS 的方法有天线单元修形技术^[4],基于频率选择表面^[5-8](FSS, frequency selective surface)的隐身天线罩技术,加载雷达吸波材料^[9-10](RAM, radar absorber metamaterials)或超材料技术,电磁超表面^[11-13](EMS, electromagnetic surface)技术。带内隐身设计中常用修形、散射对消技术、加载超表面和人工磁导体^[14](AMC, artificial magnetic conductor)。

天线修形和散射对消技术可以在不改变天线尺寸和不对天线增加额外结构的基础上降低天线的带内 RCS。贾永涛等人^[15]设计了一种加载 U 型缝隙的新型微带贴片,与矩形贴片参考单元天线形成散射对消,在 4~8 GHz 频带实现了 RCS 缩减,交叉极化 RCS 缩减峰值达 23 dB。文献 [16] 中设计了一种加载弧型开口的微带天线单元,与矩形贴片参考单元组成 4×4 阵列天线,在 5.6~6.2 GHz 范围内实现了 6 dB 以上的双极化 RCS 缩减。文献 [17] 中设计了一种超表面阵列天线,利用奇偶模分析设计了两种不同的天线单元,并利用算法对单元在阵列中的排布进行编码优化,在 5.1~6.9 GHz 频带内实现了 6 dB 以上的 RCS 缩减。文献 [18] 中设计了一种加载 T 型缝隙的微带天线单元结构,与传统微带单元结构组阵实现了阵列天线的散射对消,在天线工作频带内实现了 14.1 dB 和 17.6 dB 的双极化 RCS 缩减。上述阵列散射对消方法适用于平面阵列天线的 RCS 缩减设计,在平面阵列中通过周期边界可以获得单元在入射平面波激励下的相位信息。然而当在进行共形阵列天线的散射对消设计时,共形阵列中不同位置单元间的总相位差来源于单元本身的散射相位和空间相位差,无法按照平面周期性边界进行相位分析,因此传统设计方法无法直接用于共形阵列天线散射对消。

随着近年来特征模理论的发展,应用特征模理论对天线进行特征模式分析并指导天线设计逐渐变成了一种常用的方法,越来越多的文献 [19-21] 中通过对天线不同模式的激励程度及模式表现占比分析,设计出符合目标性能的天线。在特征模理论中,天线的特征模式反映的是其本身物理性质^[22],且其特征电流加权的内积是自共轭的,具有正交性质。文献 [19] 中将天线按照特定频率将贴片分割成若干分之一个波长的基元,通过基于特征模式分析的 NSGA-II 算法对每个基元编码并进行优化,通过增强对目标模式的激励得到了在 4.75~5.7 GHz 频带内具有良好选择特性和快速滚降特性的滤波天线。文献 [20] 中通过对天线进行特征模式分

析,利用两层加载 U 型缝隙的单馈点微带进行堆叠,通过两层微带上具有的等幅正交相位差模式设计了一种具有 5 个相邻正交相位差模式的圆极化天线,在 52.7% 相对带宽内实现了轴比小于 3 dB 且驻波系数小于 2 的多模圆极化。文献 [21] 采用特征模理论指导缝隙天线的修形设计,在 59.6% 带宽内的 RCS 缩减均值达 5 dB,特征模理论为平面微带单元天线低散射修形设计提供了更清晰的理论指导。近几年,学者们利用特征模理论指导天线单元修形设计、平面阵列散射缩减设计等。文献 [23] 基于特征模式对消原理设计了一种工作频带在 4.55~5.49 GHz 低散射阵列天线,在双极化下的 RCS 缩减带宽分别达到了 62.3% 和 35.7%。在对平面阵列天线的单元进行分析设计时,由于相邻阵元之间波程差相同,可以通过加载周期边界的方法对阵列天线进行设计仿真,而共形阵列中相邻单元之间波程差与共形载体有关,传统的阵列天线设计方法在共形阵列天线设计中的应用受到了限制。由于特征模理论可用于分析任意结构形式天线的特征模式,因此共形天线的特征模式分析可用于指导其散射模式控制。

针对共形阵列天线的散射对消设计,本文采用特征模理论对共形单元进行模式分析,通过天线单元修形对不同位置的共形单元主要散射模式进行调控,在保证辐射模式的前提下使不同位置共形单元的散射模式实现对消。本文设计了一种在辐射贴片上加载寄生枝节的新型共形单元,新单元中寄生贴片仅改变散射模式电流,不对辐射模式电流造成影响,通过增加寄生结构的方式实现对散射电流的独立调控,该新型单元与参考单元组成共形阵列,在天线工作频带内可实现散射对消。

1 特征模理论

特征模理论中的本征模式仅与物体的材料和结构有关,反映的是物体的固有属性,是对天线工作机理的合理解释,其指导天线设计的关键是通过对特定模式的激励使天线产生期望的方向图。在不同的激励下,任意电磁物体表面的感应电流可以展开为一系列完备正交的特征电流的叠加:

$$\vec{J} = \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \vec{J}_n \quad (1)$$

其中: $\vec{J}_n$ 代表模式特征电流, α_n 为第 n 个特征电流的模式权重系数 (MWC, modal weighting coefficient), 特征电流的 MWC 可以通过下面公式进行求解:

$$\alpha_n = \frac{\langle \vec{E}^i, \vec{J}_n \rangle}{1 + j\lambda_n} \quad (2)$$

其中: $\vec{E}^i$ 是激励电场, λ_n 为特征值, 模式权重系数 α_n 代表每个特征模式的贡献。结合式 (1) 可以得到:

$$\vec{E}_S = \sum_{n=1}^N \alpha_n \vec{E}_n = \alpha_1 \vec{E}_1 + \alpha_2 \vec{E}_2 + \cdots + \alpha_N \vec{E}_N \quad (3)$$

散射场可以表示为:

$$\vec{E}_S = \sum_{n=1}^N |\alpha_n| \cdot |E_n| e^{j(\gamma_n + \varphi_n)} = \sum_{n=1}^N A_n \cdot e^{j\varphi_n} \quad (4)$$

式中, $|\alpha_n|$ 为 MWC 的幅度, $|E_n|$ 为特征远场的幅度, γ_n 为 MWC 的相位, φ_n 为特征远场的相位, A_n ($A_n = |\alpha_n| \cdot |E_n|$) 和 φ_n ($\varphi_n = \gamma_n + \varphi_n$) 分别为第 n 个特征模式场的幅值和相位。

在平面阵列中天线单元对入射平面波进行反射时具有相同的相位差, 因此可通过任一单元的反射相位得到阵列中其他位置单元的反射相位。当使用两种单元组成如图 1 中所示的共形阵列时, 不同位置单元对入射平面波的反射相位不同, 总相位差由共形单元散射相位及空间相位差共同决定。

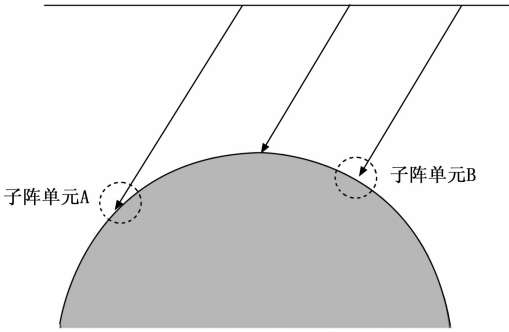


图 1 两种单元组成共形阵列的结构示意图

两种天线单元的电场反射幅度分别为 A_1 和 A_2 , 电场反射相位分别为 φ_1 和 φ_2 , 则两种单元组成的阵列天线的总反射场可以写为:

$$E^S = A_1 e^{j\varphi_1} F_1 + A_2 e^{j\varphi_2} F_2 \quad (5)$$

式中, E^S 代表阵列天线的总散射场, F_1 和 F_2 分别是两个子阵的散射阵因子, 结合式 (4) 和 (5) 可以得到:

$$\vec{E}_S = \left(\sum_{n=1}^N |\alpha_n| \cdot |E_n| e^{j(\gamma_n + \varphi_n)} \right) \cdot F_1 + \left(\sum_{m=1}^M |\beta_m| \cdot |E_m| e^{j(\gamma_m + \varphi_m)} \right) \cdot F_2 \quad (6)$$

α_n 和 β_m 为两个单元的模式权重系数, γ_n 和 γ_m 为两个单元特征远场的相位, φ_n 为空间相位差。当两种单元组成的子阵相同时, $F_1 = F_2 = F$, 则式 (6) 简化为:

$$\vec{E}_S = \left[\left(\sum_{n=1}^N |\alpha_n| \cdot |E_n| e^{j(\gamma_n + \varphi_n)} \right) + \left(\sum_{m=1}^M |\beta_m| \cdot |E_m| e^{j(\gamma_m + \varphi_m)} \right) \right] \cdot F \quad (7)$$

综合两单元空间相差后, 当 $[(\gamma_n + \varphi_n) - (\gamma_m + \varphi_m)]$ 满足对消条件时, 单元 A 的散射模式与单元 B 的散射模式相位差满足 $180^\circ \pm 37^\circ$, 两单元将实现 10 dB 的散射对消。

2 共形对消单元设计

2.1 新型修形单元设计

随着现代无线电通讯技术的进步, C 波段微带天线在无人平台中应用广泛, 本文设计了一种工作于 C 波段的微带天线, 并以其为例开展共形阵列天线的散射对消研究。通过散射对消实现共形阵列的 RCS 缩减通常需要设计两种结构不同的天线单元, 两种天线单元需要具有相同的辐射性能以保证组成阵列后可以正常工作, 同时两种不同结构单元的散射模式可以进行散射对消, 从而实现阵列整体的 RCS 缩减。

特征模理论采用一组正交的特征电流表示电磁物体的固有属性, 根据共形阵列中共形单元位置和入射波方向, 可以通过对共形单元的特征模式分析得到其主要模式, 该理论可用于指导共形单元的散射模式调控。在平面阵列的 RCS 缩减研究中, 常常对辐射贴片部分修形调控散射电流路径, 通过在辐射贴片边缘加载矩形槽、弧形槽及多阶分形结构槽调控散射模式的相位, 当两种单元的散射模式电流反相时, 两种不同结构单元组成的阵列 RCS 可得到缩减。本文基于特征模式理论的指导, 对共形的微带贴片单元进行辐射和散射的特征模式分析, 根据模式电流特点设计了一种加载寄生贴片的新共形微带单元, 将设计单元和参考单元组成共形阵列, 通过两种单元的散射模式对消实现共形阵列天线的带内 RCS 缩减。

首先设计了一个传统微带贴片形式的共形单元 (称为单元 A), 该单元共形于半径 $R = 100$ mm 的圆柱表面, 单元 A 的俯视结构如图 2 (a) 所示。天线分为上层辐射贴片、介质层、L 型馈电结构和地板, 介质基板的厚度为 5.08 mm、相对介电常数为 3、损耗正切为 0.001 3, 耦合馈电层与金属地板的距离 $H = 2$ mm。修形后的共形单元 (称为单元 B) 俯视结构如图 2 (b) 中所示, 单元 A 和单元 B 中各结构的详细结构尺寸参数如表 1 中所示。

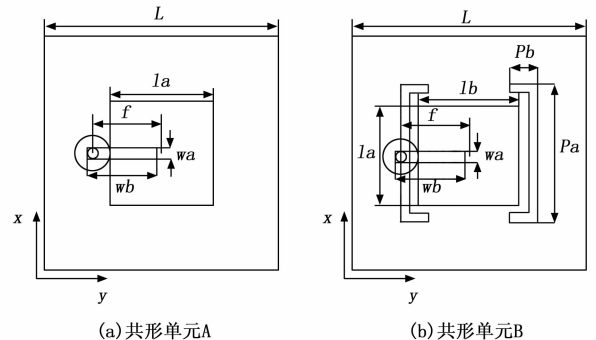


图 2 单元 A 和单元 B 结构示意图

表 1 天线主要尺寸参数

参数	参数值/mm	参数	参数值/mm
L	27	wb	8.15
la	12	f	8
lb	11.7	Pa	16
wa	1.3	Pb	3.2

对参考天线（单元 A）进行辐射特征模式和散射特征模式分析，得到单元 A 模式的模式权重系数、模式电流等参数。根据辐射模式电流和散射模式电流的分布特点指导单元修形设计，在尽量保证单元天线辐射模式电流分布不变的情况下，使得设计单元的散射模式电流与单元 A 散射模式电流形成对消。计算了单元 A 前 20 个特征模式，其中前 6 个模式的模式权重系数计算结果如图 3 所示，从图中可以看出，在 5~6 GHz 频带范围内，模式 1 和模式 6 的模式权重系数远高于其他模式，单元 A 的主要辐射模式为模式 1 和模式 6。模式 1 的模式权重系数在 5~6 GHz 频带范围内的幅度基本保持稳定，模式 6 的模式权重系数随着频率的升高幅度逐渐变大，在 5.9 GHz 附近，模式 6 的模式权重系数高于模式 1。

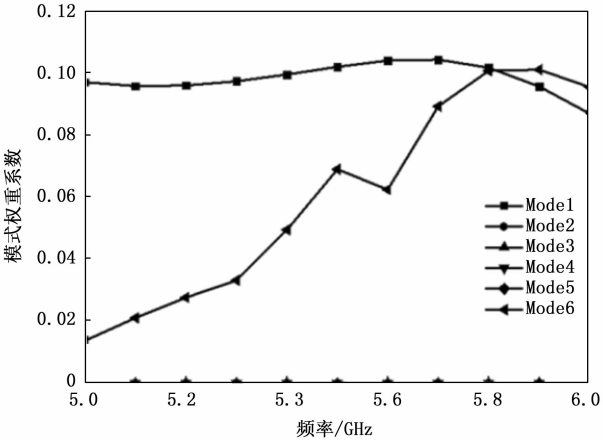
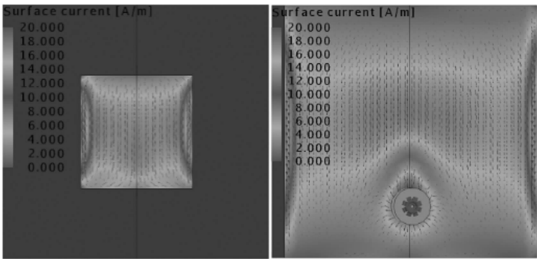


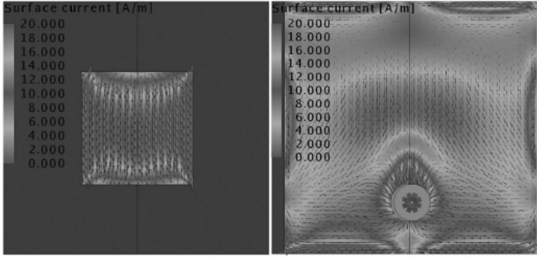
图 3 单元 A 辐射模式权重系数计算结果

模式 1 和模式 6 的模式电流分布仿真结果如图 4 (a) 和 (b) 所示，从图中可以看出，单元 A 辐射模式 1 的电流集中于辐射贴片边缘，平行于 y 轴方向；模式 6 的电流均匀分布于辐射贴片上，平行于 y 轴方向。为了保证天线辐射特性基本不变，在单元修形设计时应避免破坏辐射模式的电流，尽量避免对平行于 y 轴方向辐射贴片边缘的修形破坏辐射电流。

对单元 A 进行散射特征模式分析，工作频带内 x 极化平面波照射且天线端接 50 欧姆匹配负载情况下，计算了单元 A 的前 20 个特征模式，其中前 6 个散射模式的模式权重系数计算结果如图 5 所示。从图中可以看出，单元 A 的散射模式 2 和模式 6 为主要的散射模式，且模式 2 的 MWC 随着频率的升高逐渐减小；模式 6 的 MWC 随着频率的升高逐渐增大，在 5.8 GHz 附近，模



(a) 单元 A 辐射模式 1 特征电流



(b) 单元 A 辐射模式 6 特征电流

图 4 单元 A 主要辐射模式电流分布仿真结果

式 6 的模式权重系数高于模式 2。

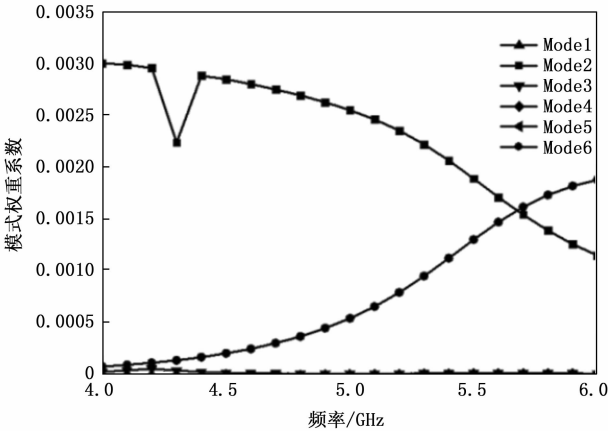


图 5 单元 A 散射模式权重系数计算结果

单元 A 的散射特征模式电流仿真结果如图 6 所示，从图中可以看出散射模式电流与辐射模式电流的方向正交，主要集中于辐射贴片边缘平行于 x 轴方向。可结合共形单元 A 辐射模式和散射模式电流分布特点，对单元 A 辐射贴片进行修形设计得到新的共形单元。

在设计对消单元时通常采用修形方法，微带贴片单元修形常用手段是在辐射贴片上刻蚀缝隙，通过改变散射电流路径长度实现对散射相位的调控。当修形单元与参考单元的相位差达到 180° 时，修形单元与参考单元可形成散射对消。但是，刻蚀缝隙截断电流或者改变电流路径易影响单元的辐射电流分布，造成天线阻抗失配或者增益下降等。本文提出在辐射贴片周围加载寄生贴片的方式，在辐射贴片散射电流较强的边缘处加载宽为 1 mm 的寄生贴片，该设计通过加载寄生贴片引入了容性结构，该结构可调控散射模式的相位，将该新型共形单元称为（单元 B）。

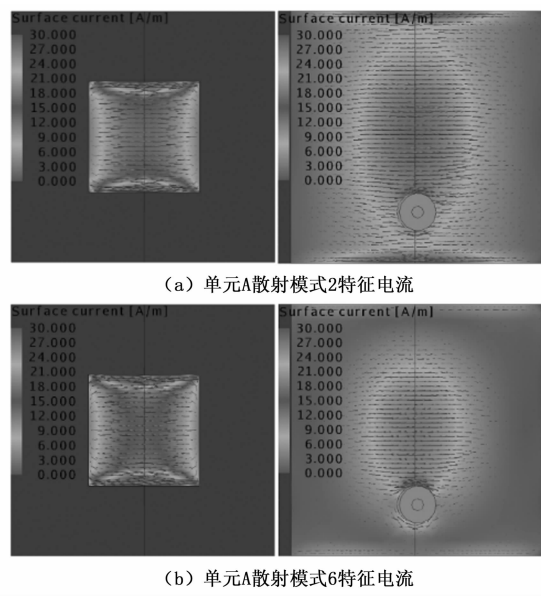


图 6 单元 A 主要散射模式电流分布仿真结果

对单元 B 的辐射特性进行特征模式分析，模式权重系数的计算结果如图 7 所示，从图中可以看出，模式 1 与模式 6 为主要辐射模式。通过分析对比单元 B 和单

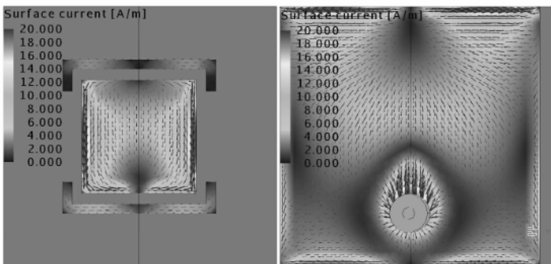
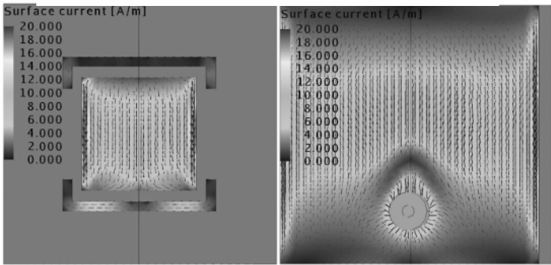
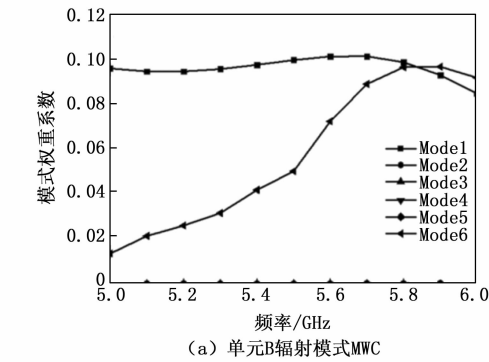


图 7 单元 B 辐射模式参数仿真结果

元 A 主要辐射模式的模式权重系数和模式电流分布，单元 B 与单元 A 主要辐射模式电流均集中于辐射贴片边缘，平行于 y 轴方向，且两单元辐射模式的 MWC 幅度相近。因此，单元 B 与单元 A 的辐射模式基本相同。当适用单元 A 和单元 B 组成阵列进行辐射工作时，两种单元可当作相同单元，该混合阵列的辐射性能与同一单元组成的阵列辐射性能基本一致。

单元 B 散射特征的模式权重系数计算结果如图 8 (a) 所示，从图中可以看出，单元 B 的主要散射模式是模式 1 和模式 6。由图 8 (b) (c) 可以看出，原辐射贴片上平行于 x 轴方向边缘处的散射电流耦合到了寄生贴片上，且寄生贴片上的感应电流方向与单元 A 辐射贴片的电流方向相反，通过改变寄生贴片枝节的长度和宽度可调整单元 B 的散射电流，从而使单元 B 的散射模式与单元 A 的散射模式实现散射对消。并且单元 B 中引入的寄生贴片不影响其辐射模式，因此，该寄生贴片结构实现了单元辐射性能和散射性能的独立调控。

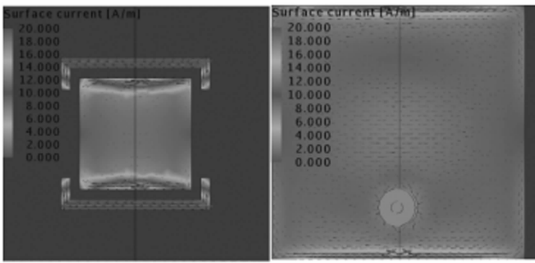
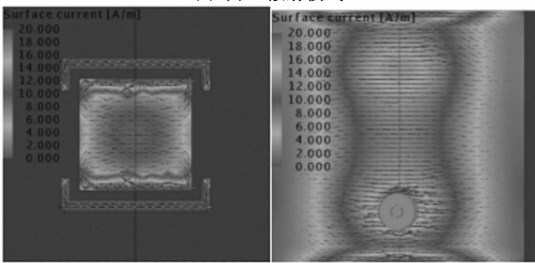
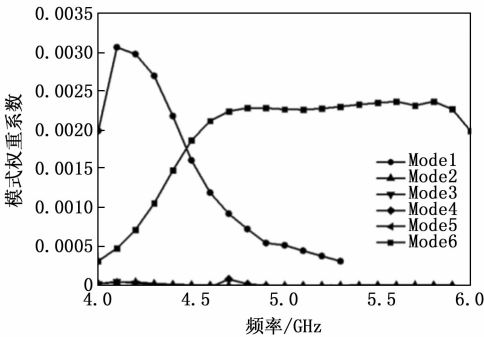


图 8 单元 B 散射特征参数仿真结果

通过对比图 5 和图 8 (a) 可看出，在 4.7 ~ 5.9 GHz 频带内，单元 A 散射模式 2 与单元 B 散射模式 6 的模式权重系数相近，即两个单元的模式幅度相近。

为了验证两单元能够在一定的频带范围内实现散射对消的效果，将单元 A 的模式 2 与单元 B 的模式 6 在典型频点处的散射电流方向进行对比，结果如图 9 所示。从图中可以看出，在 4.7 GHz 和 5.9 GHz 频点处，单元 A 辐射贴片上散射电流与单元 B 寄生贴片上散射电流的大小相近方向相反，为两单元在 4.7~5.9 GHz 频带范围内的散射对消奠定了基础。

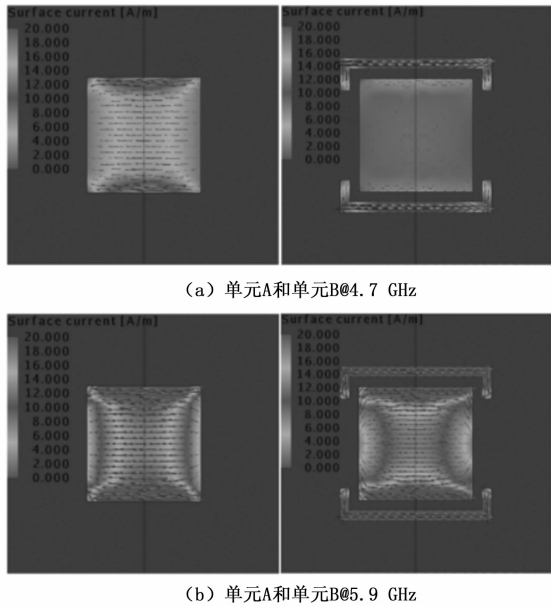


图 9 不同频点时两种单元散射模式电流分布图

2.2 单元辐射性能对比

将单元 A 和单元 B 组成混合排列的共形阵列实现共形阵列的带内 RCS 缩减。首先对两单元辐射特性进行对比验证，保证两单元工作频带与辐射方向图基本相同。对共形单元 A 和单元 B 的驻波 (S_{11}) 及辐射方向图进行仿真分析，结果如图 10 所示。从图 10 (a) 中可以看出，单元 A 和单元 B 的工作带宽基本一致，在 5.08~5.97 GHz (相对带宽 16.1%) 频带内单元 A 的 S_{11} 小于 -10 dB；在 5.05 ~ 5.89 GHz (相对带宽 15.4%) 频带内单元 B 的 S_{11} 小于 -10 dB，两种共形天线单元的共同工作频率为 5.08~5.89 GHz，相对带宽为 14.8%。从图 10 (b) 中可以看出，两种单元在 xoz 面辐射方向图和 $yo z$ 面辐射方向图基本一致，且增益均为 6.7 dB，因此，单元 A 和单元 B 可以当作是辐射性能相同的辐射阵元。

2.3 共形子阵散射性能验证

将共形单元 A 和共形单元 B 组成 1×2 的对消子阵，对该子阵进行 RCS 仿真以验证两共形单元的散射对消效果。对消子阵仿真结果如图 11 所示，入射平面波极化平行于 x 轴方向。图中分别给出了单元 A 组成的 1×2 阵列 (称为参考子阵)，以及单元 A 和单元 B

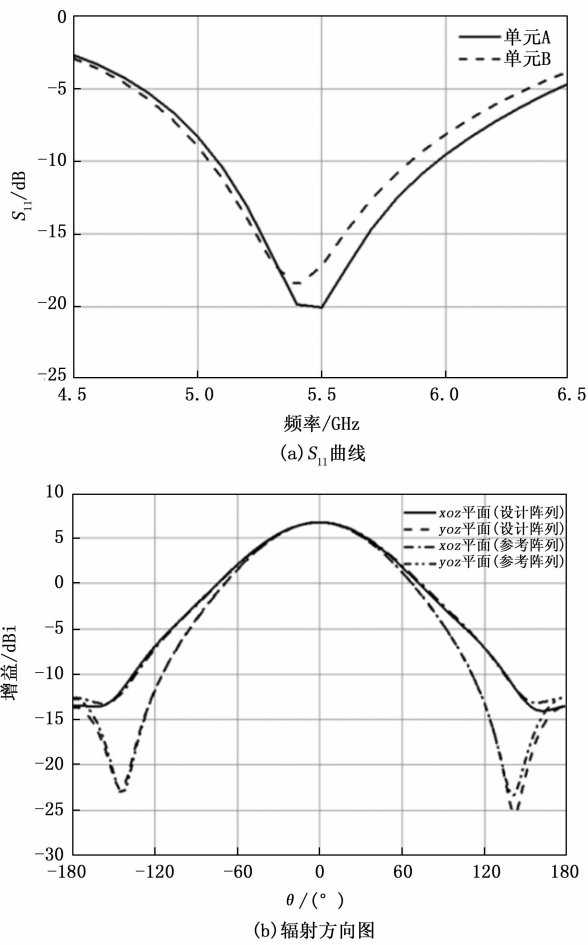


图 10 单元 A 和单元 B 辐射性能仿真结果

组成的 1×2 阵列 (称为对消子阵)。从图中可以看出，与参考子阵相比，对消子阵在 4~6.5 GHz 的频带范围内实现了 RCS 缩减效果，且 RCS 缩减峰值为 14.1 dB。

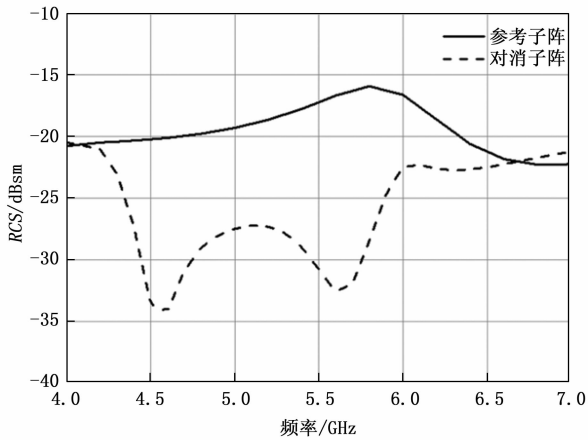


图 11 参考子阵和对消子阵 RCS 仿真结果对比

参考子阵和对消子阵在 5.5 GHz 频点的散射方向图三维仿真结果如图 12 中所示，从图中可以看出，参考子阵在阵列法向上的散射场强度较大，两个相同单元在阵面法向形成同相叠加，阵列法向的 RCS 为 -16.7 dB。对消子阵的法向的 RCS 为 -32.6 dB，散射方向图在阵

列法向形成了凹陷,这来源于单元 A 和单元 B 的散射模式对消。

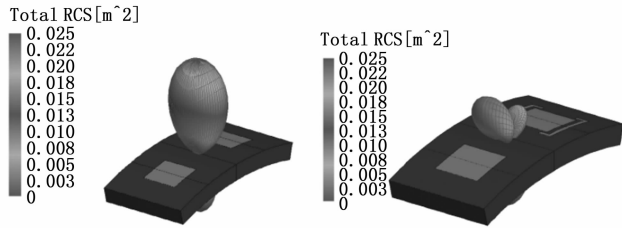


图 12 参考子阵和对消子阵散射场对比

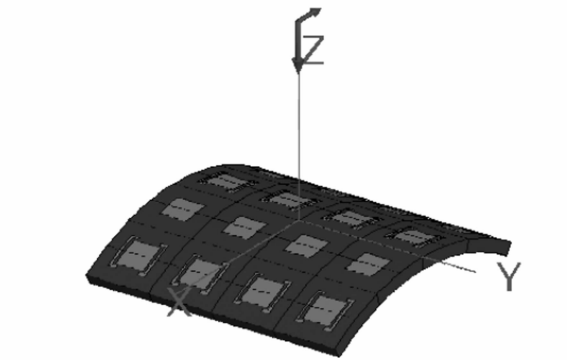
3 共形阵列辐射性能和散射性能分析

将单元 A 和单元 B 组成 4×4 的共形阵列,如图 13 (a) 所示,在 x 方向上两种单元以 ABAB 的形式组阵。当平面电磁波垂直照射情况下,分别计算了共形对消阵列和同尺寸金属平板的 RCS, x 极化和 y 极化的单站 RCS 仿真结果如图 13 (b) (c) 所示。从图 13 (b) 中可以看出,当 x 极化平面波入射时,在 $4 \sim 8$ GHz 频段内设计阵列均实现了 RCS 缩减,且频段内 RCS 缩减均值为 9.2 dB,在 5.8 GHz 频点处达到最大 RCS 缩减, RCS 缩减峰值为 21.8 dB。设计阵列对 x 极化平面波的 RCS 缩减来源于两种共形单元的散射对消。从图 13 (c) 中可以看出,当 y 极化平面波入射时,在 $4 \sim 8$ GHz 频段内,设计的共形阵列均实现了 RCS 缩减,频段内的 RCS 缩减均值为 6.3 dB。在 y 极化平面波下,设计共形阵列天线 RCS 缩减主要源于天线单元对入射平面电磁波的吸收作用。

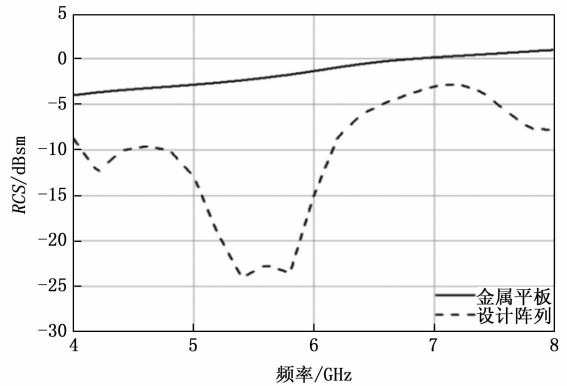
为了更直观地说明散射对消降低阵列天线 RCS 的机理,仿真计算了设计共形阵列在 5.5 GHz 频点的三维散射方向图,如图 14 所示。从图中可以看出,金属平板在平面波入射时具有强镜面反射的特点,其散射方向图在垂直方向呈最大值,设计共形阵列天线的散射方向图具有中心凹陷的特点,即在垂直入射方向的单站 RCS 值较小。与金属平板相比,设计阵列通过共形及散射对消的方法将垂直方向的一个强散射峰值分解成了空间内多个非探测角域内的弱散射峰值,且在阵列法向上形成凹陷,有效实现了阵列天线的单站 RCS 缩减。

将 16 个天线单元进行等幅馈电并对不同位置单元进行相位补偿,分别对参考共形阵列天线和对消共形阵列天线的辐射方向图进行全波仿真分析, xoz 面和 $yo z$ 面的方向图仿真结果如图 15 所示。从图中可以看出,参考阵列与设计阵列方向图基本相同,设计阵列的增益下降小于 0.1 dB。

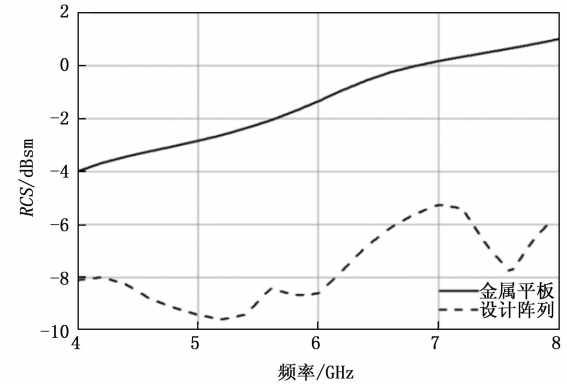
综合上述分析可知,本文设计的共形阵列天线具有较好的辐射和散射性能,在保证单元辐射特性的情况下,实现了对其散射特性的调控。将本文设计的共形阵



(a) 共形对消阵列



(b) x 极化 RCS 仿真结果



(c) y 极化 RCS 仿真结果

图 13 不同阵列形式及双极化 RCS 对比

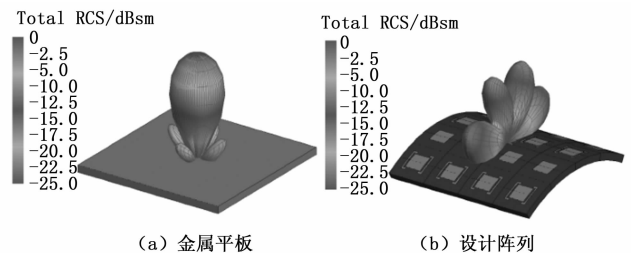


图 14 设计阵列的三维散射方向图仿真结果

列天线与其他文献中的低散射微带阵列天线进行对比,结果如表 2 所示。从表格中可以看出,其他文献中对阵列进行低散射设计时常选择散射对消技术,通过对天线本身修形设计两种具有不同散射相位的单元或在天线单

表 2 本文设计的阵列天线与其它文献设计阵列天线性能对比

论文	阵列形式	阵列规模	天线阵尺寸	工作频带/GHz	RCS 缩减频带/GHz	x 极化带内 RCS 缩减值/dBsm	RCS 缩减峰值/GHz
文献[15]	平面	4×4	$2 \lambda \times 2 \lambda$	4.75~5.25(10%)	4~8	13	23
文献[16]	平面	4×4	$1.92 \lambda \times 1.92 \lambda$	5.6~6.0(6.9%)	4~8	>6	13.8
文献[17]	平面	4×4	$1.76 \lambda \times 1.76 \lambda$	5.05~5.42(7.1%)	4~8	~	16.5
文献[24]	平面	2×2 (subarrays)	$2.82 \lambda \times 2.82 \lambda$	8.32~9.32(11.9%)	6.4~21.4	~	~
本文	曲面	4×4	$2 \lambda \times 2 \lambda$	5.09~5.89(14.6%)	4~8	19.4	21.8

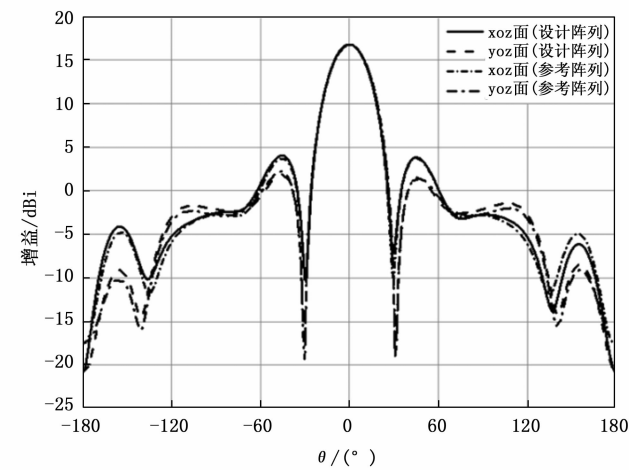


图 15 设计阵列和参考阵列天线的辐射方向图仿真结果

元上加载可进行散射对消的 AMC 结构，最终实现阵列整体的 RCS 缩减。文献中提出的方法均用于平面阵列天线的散射对消设计，本文提出采用特征模式分析的方法对共形阵列天线进行散射对消设计，在 4~8 GHz 频段范围内实现了 RCS 缩减，且在天线工作频段的带内 RCS 缩减均值达 19.4 dB。

4 结束语

本文针对共形阵列天线的带内 RCS 缩减设计进行研究，基于特征模理论指导进行共形阵列的散射对消设计。设计了一种加载寄生贴片的新型微带天线结构，寄生结构可实现对共形单元辐射和散射模式的独立调控。通过调节寄生贴片枝节长度可调控共形单元的散射相位，当设计单元与参考单元的散射模式电流方向相反时，两种单元可实现散射对消。将两种共形阵元组成 4×4 的共形阵列，与参考阵列相比，设计共形阵列天线的增益下降小于 0.1 dB。设计共形阵列在 4~8 GHz 频段内实现了 x 极化和 y 极化 RCS 缩减，带内 x 极化 RCS 缩减均值达 19.4 dB。

综上，本文结合传统平面散射对消和特征模理论进行共形阵列天线散射对消设计，对共形阵列天线的低散射设计提供了一种新设计方法。本文研究了非平面对称共形阵列天线的 RCS 缩减设计，在非平面非对称的共形阵列 RCS 缩减上仍有进步空间，可以通过对不同位置单元的散射控制进一步提升阵列 RCS 缩减效果。

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] 张 澎. 低可探测性与低截获概率天线理论与设计 [M]. 北京：航空工业出版社，2022.

[3] LARS J, PATRIK P. Conformal array antenna theory and design [M]. Wiley, 2006.

[4] LIU Y, LI N, ZHANG W, et al. Low RCS and high-gain patch antenna based on a holographic metasurface [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18 (3): 492–496.

[5] PENG J J, QU S W, XIA M, et al. Conformal phased array antenna for unmanned aerial vehicle with $\pm 70^\circ$ scanning range [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69 (8): 4580–4587.

[6] XING Z Y, YANG F, YANG P, et al. A low-RCS and wideband circularly polarized array antenna co-designed with a high-performance AMC-FSS radome [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21 (8): 1659–1663.

[7] HUANG Z. Tapered resistive sheets and FSS absorber loading for the wideband RCS reduction of the elliptic surface at TM polarization [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71 (7): 6191–6195.

[8] CHEN J, WANG X, YANG L, et al. Asymmetrical low-RCS FSS-based antenna for tri-band shared-aperture array [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23 (5): 1563–1567.

[9] LI Y, LI D, LUO H, et al. Co-evaluation of reflection loss and surface wave attenuation for magnetic absorbing material [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66 (11): 6057–6060.

[10] WU T, LI Y, GONG S X. A novel low RCS microstrip antenna using aperture coupled microstrip dipoles [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2008, 22: 953–963.

[11] BAISAKHI B, SUDEB B, RAHUL K J, et al. Wideband RCS reduction of a linear patch antenna array using AMC metasurface for stealth applications [J]. IEEE Access, 2023, 11: 127458–127467.

[12] MOHAMED F, MAHMOUD A. A monostatic and bi-

- static RCS reduction using artificial magnetic conductor metasurface [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71 (2): 1988–1992.
- [13] 李 桐, 杨欢欢, 李 奇, 等. 基于共享孔径技术的低 RCS 电磁超构表面天线设计 [J]. *物理学报*, 2024, 73 (12): 88–98.
- [14] CHENG Y F, FENG J, LIAO C, et al. Analysis and design of wideband low-RCS wide-scan phased array with AMC ground [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20 (2): 209–213.
- [15] LIU Y, JIA Y T, ZHANG W, et al. An integrated radiation and scattering performance design method of low-RCS patch antenna array with different antenna elements [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67 (9): 6199–6204.
- [16] 兰俊祥, 曹祥玉, 高 军, 等. 一种新型的低散射微带天线阵设计 [J]. *物理学报*, 2019, 68 (3): 154–163.
- [17] GAO K, CAO X, GAO J, et al. Low-RCS metasurface antenna array design with improved radiation performance using odd-and even-mode analysis [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2022, 21 (2): 421–425.
- [18] 韩嘉良, 贾 丹, 韩国栋, 等. 一种具有宽带双极化低
- (上接第 292 页)
- [10] LI J, LU H, XUE K, et al. Temporal net grid model-based dynamic routing in large-scale small satellite networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68 (6): 6009–6021.
- [11] LIU Z L, LI J S, WANG Y R, et al. HGL: A hybrid global-local load balancing routing scheme for the Internet of Things through satellite networks [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2017, 13 (3): 1–16.
- [12] ZHAO N, LONG X, WANG J. A multiconstraint optimal routing algorithm in LEO satellite networks [J]. *Wireless Networks*, 2021: 1–12.
- [13] SU H, YI H. A deep reinforcement learning based routing scheme for LEO Satellite networks in 6G [C] // 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2023: 1–6.
- [14] CUADRA F L, SORET B. Continual deep reinforcement learning for decentralized satellite routing [J]. *ArXiv*, 2024, 5: 12308.
- [15] DING Z L, LIU H J, TIAN F, et al. Fast convergence reinforcement learning for routing in LEO satellite networks [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2023, 23 (11): 5180.
- [16] ZUO P L, W C, Y Z, et al. An intelligent routing algorithm for LEO satellites based on deep reinforcement
- 散射特征的微带阵列天线 [J]. *计算机测量与控制*, 2023, 31 (4): 281–288.
- [19] LI K, SHI Y. Filtering antenna synthesis based on characteristic mode theory [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70 (5): 3308–3319.
- [20] ZENG J P, ZHANG Z, LIN F H, et al. Penta-mode ultrawideband circularly polarized stacked patch antennas using characteristic mode analysis [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70 (10): 9051–9060.
- [21] ZHAO J C, CHEN Y K, YANG S W. In-band radar cross-section reduction of slot antenna using characteristic modes [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17 (7): 1166–1170.
- [22] 褚庆昕, 李 慧, 林江锋. 特征模法及其在天线设计中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [23] HAN J L, JIA D, DU B, et al. Design of broadband low-RCS array antennas based on characteristic mode cancellation [J]. *Electronics*, 2023, 12 (7): 1536.
- [24] SHI Y, MENG Z K, WEI W Y, et al. Characteristic mode cancellation method and its application for antenna RCS reduction [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18 (9): 1784–1788.
- learning [C] // 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference, 2021: 1–5.
- [17] TANG Q Q, FEI Z S, LI B, et al. Stochastic computation offloading for LEO satellite edge computing networks: a learning-based approach [J]. *IEEE Internet of Things*, 2024, 11 (4): 5638–5652.
- [18] YANG L, ZHANG H T, QI Y W, et al. Available energy routing algorithm considering QoS requirements for LEO satellite network [J]. *Computer Communications*, 2024, 217: 87–96.
- [19] ZHANG C, ZHANG Z. Task migration for mobile edge computing using deep reinforcement learning [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2019, 9 (6): 111–118.
- [20] HAN X Y, XIE M X, YU K, et al. Combining graph neural network with deep reinforcement learning for resource allocation in computing force networks [J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2024, 25 (5): 701–712.
- [21] WANG C, WANG H, WANG W D. A two-hops state-aware routing strategy based on deep reinforcement learning for LEO satellite networks [J]. *Electronics*, 2019, 8 (9): 920.
- [22] ZHANG S B, LIU A J, HAN C, et al. Multiagent reinforcement learning based orbital edge offloading in SAGIN supporting internet of remote things [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10: 20472–20483.