

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.02.003

吸波材料覆盖直升机强散射源 RCS 缩减分析

程健来¹, 孔祥鲲^{1,2}, 费钟阳², 招启军²

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室, 南京 210016;

2. 南京航空航天大学航空学院直升机动力学全国重点实验室, 南京 210016)

摘要: 针对武装直升机的宽带隐身问题, 提出利用射线追踪和逆合成孔径雷达 (Inverse synthetic aperture radar, ISAR) 成像确定直升机强散射源位置的方法, 形成电磁超构材料和磁性材料一体化设计直升机部分强散射源的隐身设计构想, 并计算分析了两款隐身材料加载后对整机隐身效果的影响。首先, 分析等效媒质理论、射线追踪与 ISAR 成像原理。然后, 通过射线追踪以及 ISAR 成像的计算, 精确且直观地捕获强散射源部位。最后, 给出了两款材料的反射系数并分析加载直升机后单站雷达散射截面 (Radar cross section, RCS) 变化。计算结果表明, 两种不同类型隐身材料覆盖直升机强散射源部位后可以达到局部角域范围内 RCS 缩减的目的, 为隐身材料和直升机蒙皮及旋翼的融合设计提供了参考。

关键词: 直升机; 雷达散射截面; 射线追踪; 逆合成孔径雷达成像; 电磁超构材料; 磁性材料

中图分类号: V218

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2024)02-0217-10

RCS Reduction Analysis of Helicopter's Strong Scattering Source Covered with Absorbing Materials

CHENG Jianlai¹, KONG Xiangkun^{1,2}, FEI Zhongyang², ZHAO Qijun²

(1. Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics, College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. National Key Laboratory of Helicopter Aeromechanics, College of Aeronautics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In response to the broadband stealth challenges faced by armed helicopters, this paper proposes a method that utilizes ray-tracing and inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging to pinpoint the locations of strong scattering sources of the helicopter. The paper introduces a conceptual design that integrates electromagnetic metamaterials and magnetic materials into the strong scattering source regions of the helicopter. The stealth effects are calculated and analyzed after incorporating two types of stealth materials onto the helicopter. The paper firstly analyzes the principles of equivalent medium theory, ray-tracing and ISAR imaging. Subsequently, through the calculations of ray-tracing and ISAR imaging, the locations of strong scattering source can be captured accurately and intuitively. Finally, the reflection coefficients of the two types of stealth materials are presented and mono-station radar cross section (RCS) changes are analyzed after materials are loaded on the helicopter. The calculation results show that the two different types of stealth materials can achieve the RCS reduction in the special angular domain after covering part of the helicopter's strong scattering source, providing a reference for the integration design of stealth materials, helicopter skins

基金项目: 国家自然科学基金 (62071227); 航空科学基金 (20220018052002); 南京航空航天大学雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室开放基金 (NJ20220005)。

收稿日期: 2023-10-06; **修订日期:** 2024-01-18

通信作者: 孔祥鲲, 男, 副教授, E-mail: xkkong@nuaa.edu.cn。

引用格式: 程健来, 孔祥鲲, 费钟阳, 等. 吸波材料覆盖直升机强散射源 RCS 缩减分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(2): 217-226. CHENG Jianlai, KONG Xiangkun, FEI Zhongyang, et al. RCS reduction analysis of helicopter's strong scattering source covered with absorbing materials[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(2): 217-226.

and main rotors.

Key words: helicopter; radar cross section (RCS); ray-tracing; inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging; electromagnetic metamaterial; magnetic material

武装直升机在军事领域中发挥着越来越重要的作用,是现代军事武装系统中不可以缺少的技术装备。随着高分辨率雷达和反隐身技术的迅速发展,原来未被重视的,包含直升机在内的“低小慢”雷达探测目标电磁环境适应性减弱,隐身需求逐渐凸显。隐身材料与直升机强散射区蒙皮的一体化融合设计是实现雷达目标隐身的重要手段。通过开展武装直升机的雷达散射截面特性计算及吸波材料电磁散射参数分析,发现强散射源,并通过涂覆吸波涂层材料减缩直升机的雷达散射截面,对增强武装直升机雷达隐身性能,提升战场生存能力,促进多功能材料与结构融合设计等方面具有重要参考价值。

20世纪末21世纪初,美国为了适应新世纪的战场作战环境设计了科曼奇RAH-66隐身直升机,可见直升机的隐身设计想法很早就提出并付诸实施。该直升机机身采用了多面体圆滑边角设计,以减小直角反射面,并采用吸波材料^[1]。国内积极开展了对直升机雷达散射特性的研究。王莲子等^[2]提出了一种结合迁移学习基于全卷积神经网络的逆合成孔径雷达(Inverse synthetic aperture radar, ISAR)自聚焦算法。费钟阳等^[3]研究了基于动态雷达散射截面(Radar cross section, RCS)特征相似的直升机靶机旋翼设计方案。陈炆等^[4]通过建立目标雷达散射特性分析的计算电磁学来提高直升机的雷达散射特性预估的准确性,同时利用涂覆式吸波材料对直升机RCS缩减进行了研究。Zhou等^[5]对复合直升机多旋翼动态雷达界面相应进行了分析研究。蒋相闻^[6]对直升机气动/雷达隐身特性做了综合优化设计。苏东林等^[7]做了武装直升机雷达散射截面估算方法研究。包晓翔等^[8]研究了通用直升机雷达散射特性及RCS缩减。上述工作对直升机的RCS估算方法、强散射区域分析、动态电磁散射作了系统分析,但没有将宽带电磁超材料吸波结构和磁性吸波材料引入到直升机隐身设计中,也没有涉及利用雷达成像的方法精确捕捉直升机的强散射源。

本文针对直升机在雷达频带面临的宽带隐身问题,利用射线追踪与ISAR成像方法追踪直升机的强散射,开展电磁超构材料和磁性吸波材料加载直升机强散射源前后整机RCS的缩减研究。通过在典型频点处对武装直升机仿真模型航向、俯仰、滚转3个姿态的单站RCS分析,得到RCS较大或突变较大的角度,并对这些角度开展射线追踪和

ISAR成像,找到在该角度上强散射源部位。其中电磁超构材料的性能体现需满足最小周期性,借助等效媒质理论降低计算资源并将其应用于鼻锥、侧向等机身面积较大部位。磁性吸波材料FGM-125超薄且耐高温,直接涂敷应用于强散射部位的旋翼及尾桨。将两种材料覆盖直升机强散射源后再次进行典型频点的单站RCS仿真,分析加载前后整机在宽频带范围内各姿态角域单站RCS缩减量。

1 RCS及强散射源分析方法

1.1 等效媒质理论

电磁超构材料最终要加载在直升机的强散射源部位,由于直升机模型的尺寸太大,作为电大尺寸物体此处适用高频渐进求解器进行仿真,否则可能会占用大量计算资源导致无法仿真。在使用高频渐进求解器进行电大尺寸模型的辐射和散射仿真过程中,介质材料无法直接以实体的形式画出。此处需要利用涂敷操作完成均匀介质材料的加载,而这就需要电磁超构材料等效为一层均匀媒质,通过等效的介电常数和磁导率建立等效模型涂敷在电大尺寸的直升机上,从而利用高频渐进求解器计算仿真节约计算资源。

利用等效媒质理论将超宽带电磁超构吸波体等效为均匀媒质,其电磁特性可以由反演的等效介电常数和磁导率来表示^[9],均匀等效媒质折射率 n 和阻抗 Z 与超材料散射参数的关系为^[10]

$$Z = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (1)$$

$$n = \frac{1}{k_0 d} \arccos \left[\frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 - S_{21}^2) \right] \quad (2)$$

式中: S_{11} 为反射系数; S_{21} 为传输系数; k_0 为空气的传输常数; d 为有效厚度; Z 为阻抗; n 为折射率。根据无源媒质的阻抗实部 $\text{Re}(z) \geq 0$ 、折射率虚部 $\text{Im}(n) \geq 0$ 的限定条件,可以唯一确定电磁超构材料的等效介电常数 $\epsilon = n/z$ 及磁导率 $\mu = n \cdot z$ 的取值。通过在超材料吸波体金属背板适当开孔,既可以忽略其对反射系数的影响,又同时满足传输系数不为零的反演条件^[11]。

反演介电常数和磁导率构建的同厚度等效模型对比本课题组设计完成的2~18 GHz电磁超构吸波材料仿真计算结果如图1所示,可以看出二者反射系数与吸波率几乎完全重合,证明等效模型构建准确,为下一步吸波体覆盖直升机强散射源计算奠定基础。

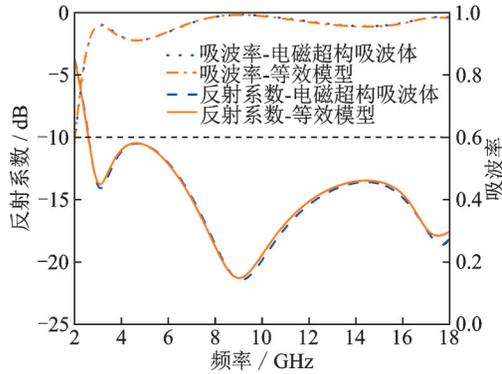


图 1 2~18 GHz 电磁超构吸波材料与等效模型的反射系数/吸波率对比

Fig.1 Comparison of reflection coefficient/absorption rate between electromagnetic metamaterial absorber and equivalent model at 2—18 GHz

1.2 射线追踪技术

弹跳射线 (Shooting and bouncing ray, SBR) 法是一种正向的射线追踪技术^[12-16], 因其考虑多次散射同时也适用于腔体结构, 被广泛应用于任意形状空腔和复杂大型目标尺寸的计算。

SBR 有效结合了物理光学法 (Physical optics, PO) 和几何光学法 (Geometric optics, GO) 的特点, 对目标表面感应电流进行 PO 积分可以获得当前射线管的散射场, 利用射线的路径追踪和场强追踪得到该射线经过一次或多次反射后离开目标表面位置时的场强大小, 从而得到目标物体的热点 (强散射点) 分布图。

1.3 ISAR 成像原理

逆合成孔径雷达成像是一种雷达固定不动, 目标移动的成像方式, ISAR 技术可以全天时、全天候地对空中目标如飞机、导弹等进行二维成像, 其中运算量较小、应用较普遍的成像算法是距离-多普勒算法。

对目标与雷达之间相对运动中的平动分量进行补偿而只保留转动分量, 假设目标旋转的角速率为 ω , 则雷达的基带回波信号表示为^[17]

$$G(f, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(x, y) \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi f}{c}(x \sin \theta + y \cos \theta)\right] dx dy \quad (3)$$

式中: f 为发射信号频率; θ 为目标转角; c 为电磁波的传播速度; $\rho(x, y)$ 为目标散射系数在二维成像平面的分布函数。将频率和角度之间的二维回波信号进行傅里叶逆变换, 即可得到二维 ISAR 成像。其中纵向距离分辨率 $\rho_r = c/2B$, 依靠雷达发射宽频带信号; 横向方位角分辨率 $\rho_a = \lambda/2\Delta\theta$, 依靠目标转动的角速率^[18]。本研究中, 射线追踪技术和 ISAR 成像方法被用来追踪单站 RCS 强角域

范围内的直升机强散射源。

2 直升机强散射源追踪

直升机强散射源的捕获流程如图 2 所示, 需要经过 3D 建模、单站 RCS 强散射方位确定、射线追踪及 ISAR 成像等步骤。通过热点图与成像图的对比较证得到直升机的强散射源。

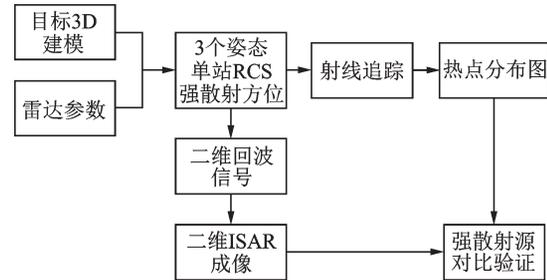


图 2 强散射源捕获流程

Fig.2 Capture process for strong scattering sources

2.1 直升机仿真模型及强散射方位

目标建模过程中, 考虑到武装直升机几何结构复杂, 在保留直升机整体特征的基础上进行细节简化, 减小计算负担。仿真模型主要由旋翼、鼻锥、短翼、侧向机身、尾梁、平尾、尾桨等各部分构成, 计算模型的最大长度约为 15.4 m, 仿真模型如图 3 所示。

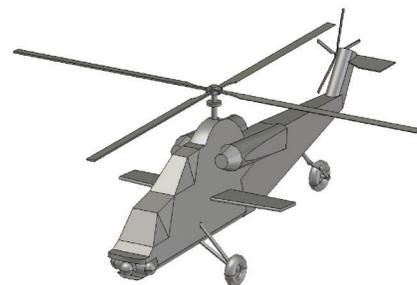


图 3 武装直升机仿真模型

Fig.3 Simulation model of gunship

雷达参数设置入射波为垂直极化, 利用典型频点 10 GHz 仿真得到直升机航向姿态、俯仰姿态和滚转姿态的单站 RCS 如图 4 所示, 以此寻找强散射源方位, 进而进一步通过射线追踪和 ISAR 成像确定直升机强散射部位。

通过图 4 中 3 种姿态的单站 RCS 分析, 可以发现航向姿态的单站 RCS 较大或突变较大的角度分别为 0° 、 93° 、 180° 和 267° , 对应 RCS 的大小为 24.3、39.1、22.1 和 39.7 dBsm。俯仰姿态的单站 RCS 较大或突变较大的角度分别为 33° 、 95° 、 257° 和 275° , 对应 RCS 的大小为 38.5、49.8、53 和 52.1 dBsm。滚转姿态的单站 RCS 较大或突变较大的角度分别为 9° 、 90° 、 171° 和 270° , 对应 RCS 的大小为 57.8、

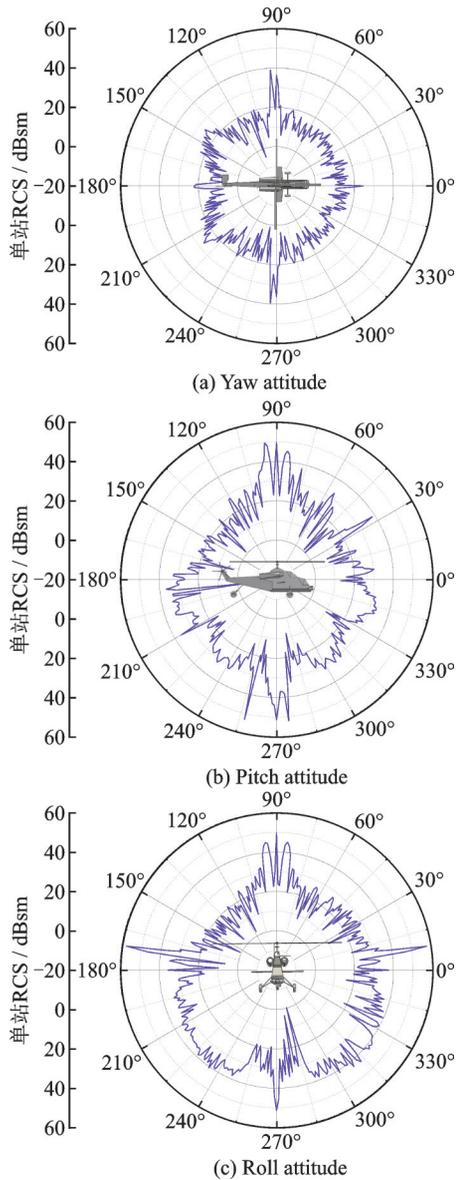


图4 单站 RCS 及扫描示意图

Fig.4 Mono-static RCS and scanning schematic diagram

49.8、57.8和51.3 dBsm。

2.2 射线追踪与ISAR成像

在10 GHz频点处每种姿态都寻找了4个强散射方位,为避免赘述,各取一个强散射角度展示仿真结果。

在进行射线追踪时,每个入射方向最多追踪6次反射射线,可以得到入射波初始撞击点和反射射线在直升机表面的追踪情况,某些部位处的入射射线经过多次反射后的反射射线与入射射线在传播方向上很接近,雷达在该方向上接收到的回波信号较大,这些部位处的电磁散射对仿真得到的单站RCS贡献很大,称这些点为强散射点(也称为热点),射线追踪的热点如图5~7中图(a)所示。趋向红色的暖色区域代表强散射区域,趋向冷色的蓝色区域代表弱散射区域。

对直升机ISAR成像,需要设定模拟目标回波的

约束条件:距离分辨率和方位分辨率均为37.5 mm,雷达工作在X波段中心频率,可由成像原理计算出带宽 $B=4$ GHz,转角 $\Delta\theta=22.6^\circ$ 。当成像边长为18 m,可在频率扫描和角度扫描各取481个点,得到频率间隔 $\Delta f=0.0083$ GHz,角度间隔 $\Delta\theta_r=0.047^\circ$ 。为了提高分辨率导致带宽与转角较大,虽会带来散射点穿越目标单元而造成图像模糊(散焦),但此处成像的重点在于寻找强散射部位而非仅仅关注成像本身,在滤除较弱信号后依旧可以在直升机上确定成像位置从而找到强散射部位,ISAR成像如图5~7中图(b)所示。

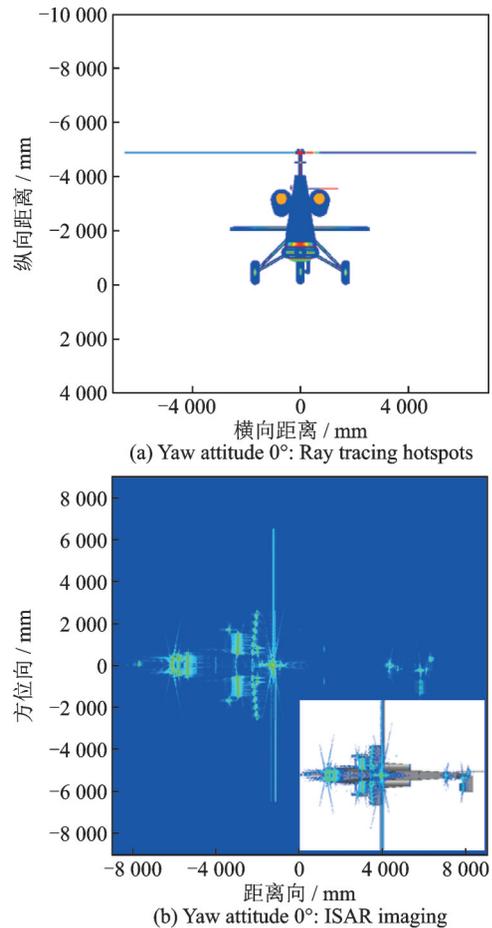


图5 航向姿态强散射源

Fig.5 Strong scattering source of yaw attitude

以入射波方向为参考,射线追踪热点图的观察角度为正视图,ISAR成像图的观察角度与正视图方向呈 90° 。通过对武装直升机仿真模型各个姿态的强散射角度进行热点追踪以及ISAR成像,可以发现射线追踪的热点图和ISAR成像图所反映强散射源二者保持一致并能相互印证,从图中可以发现暖色区域不仅位于较大部件的机体位置,还包括了面积较小的旋翼部位,这也对应了前文滚转姿态下正入射旋翼方位处单站RCS较大的现象,最终得出直升机的强散射部位主要位于鼻锥、前窗、侧向、旋翼、尾追等部位。

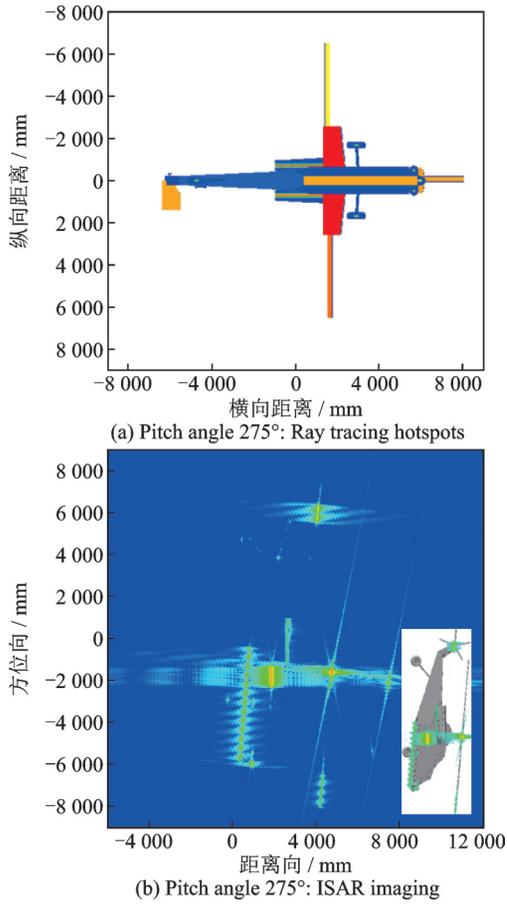


图 6 俯仰姿态强散射源

Fig.6 Strong scattering source of pitch attitude

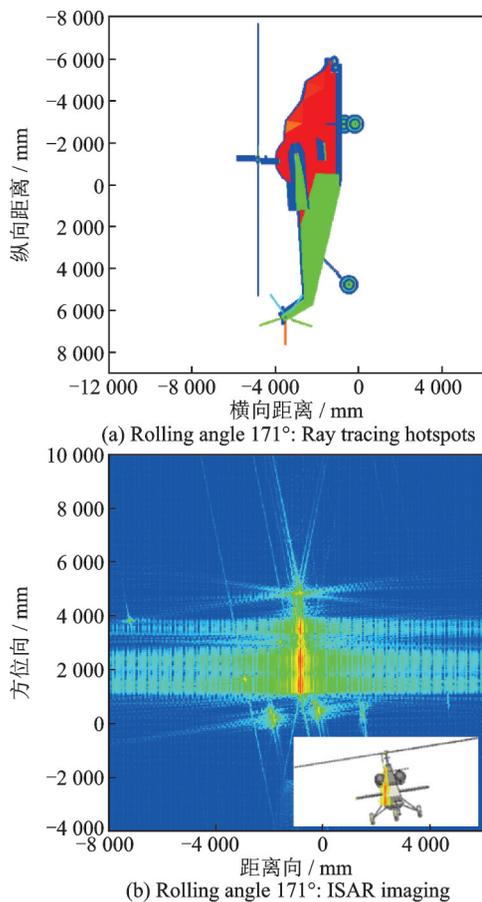


图 7 滚转姿态强散射源

Fig.7 Strong scattering source of roll attitude

3 吸波性能及 RCS 缩减分析

3.1 电磁超构吸波体和磁性吸波材料 FGM-125

电磁超构材料是通过设计人工周期结构,实现对电磁波在某段频带内的传输、反射、吸收和散射调控^[19-21],在隐身材料、智能蒙皮、天线等系统中有着广泛的应用前景。

由于电磁超构材料的性能体现需要满足最小周期个数,所以该结构主要加载在直升机机身面积较大的区域,其材料较大的结构强度可以寻求与直升机蒙皮联合设计。

为了实现 2~18 GHz 频段电磁波的超宽带吸收,本文采用的结构依托文献[22]提出的方案及复合材料加工工艺。考虑直升机蒙皮的应用场景,去除非必要的结构保护膜层,介质基板选用电磁损耗较大的环氧树脂玻璃纤维板(FR-4,介电常数 $\epsilon = 4.4$,损耗角正切 $\tan \delta = 0.02$),基板上印刷了 3 种不同的高阻碳浆结构,调整后上中下 3 层碳浆的方阻值分别为 60、70 和 60 Ω/sq 。在层与层之间加上胶膜并进行高温压合可以使整体结构紧密贴合。

超构材料吸波体的单元结构示意图如图 8 所示,单元尺寸参数 $p = 11 \text{ mm}$, $h_1 = 3.72 \text{ mm}$, $h_2 = 1.72 \text{ mm}$, $h_3 = 3.12 \text{ mm}$, $d_1 = 0.3 \text{ mm}$, $d_2 = d_3 = 1 \text{ mm}$, $a_1 = 9.8 \text{ mm}$, $a_2 = 0.6 \text{ mm}$, $b_1 = 8.8 \text{ mm}$, $b_2 = 1.2 \text{ mm}$, $c_1 = 10.4 \text{ mm}$, $c_2 = 3.8 \text{ mm}$ 。优化后的吸波体仿真模型总厚度仅为 10.9 mm,加工后的实物约为 10.58 mm,其弯曲刚度可增加到达 $1.9 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 。

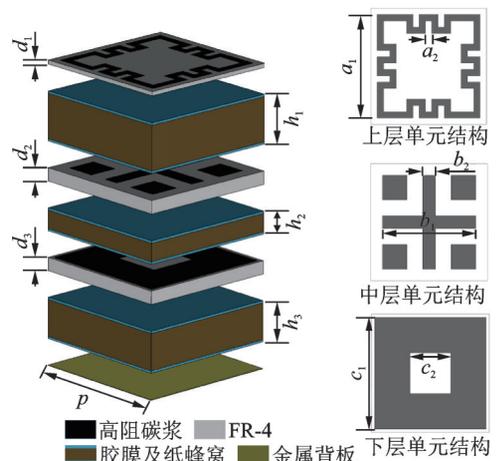


图 8 电磁超构吸波体的结构示意图

Fig.8 Exploded view of the electromagnetic metamaterial absorber

通过实验进一步验证电磁超构材料吸波体的吸收性能,对计算模型进行加工实测,单元结构数为 30×30 ,边长为 $350 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$ 。图 9 对比了 2~18 GHz 宽频内反射系数和吸波率的仿真与实

测值。可以看出,在2.22~18 GHz宽带范围内,反射系数均小于-8 dB,吸波率大于84%。仿真结果与实测结果有一定的频点偏移和低频凸起,主要是由高阻碳浆加工的阻值差距、胶膜高温压合后厚度被压缩并被挤入纸蜂窝内、高温压合产生一定形变造成的。图10给出了TE和TM两种极化波下斜入射情况的反射系数,可以看出在45°范围内,电磁超构材料都能保持较好的吸波性能。

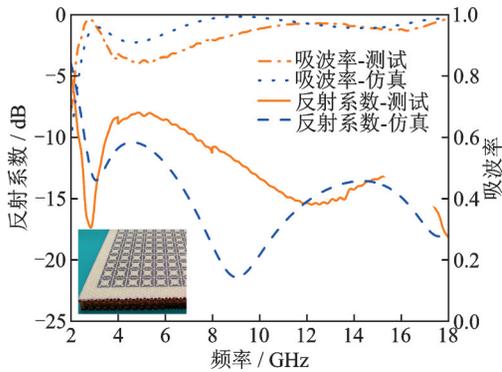


图9 电磁超构吸波体反射系数及吸波率仿真与测试结果对比

Fig.9 Simulated and measured reflection coefficient and absorption rate of electromagnetic metamaterial absorber

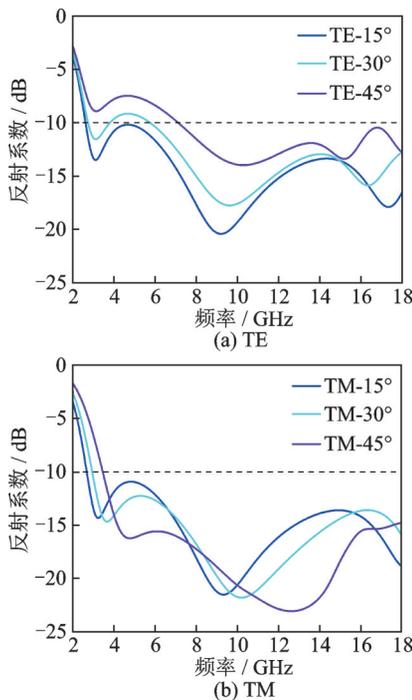


图10 电磁超构吸波体在斜入射下仿真的反射系数

Fig.10 Simulated reflection coefficients of electromagnetic metamaterial absorber under oblique incidence

磁性吸波材料^[23]由于磁损耗吸波层薄且磁导率在宽频范围内保持较高数值,是最有应用前景的宽带超薄吸波材料之一。其中,宽带磁性吸波体FGM-125是一种柔性的、薄的、含磁的有机吸波

体。它的剖面厚度仅为3.2 mm,易于同强散射目标共形设计。较高的适用温度使其在高功率电磁波辐射应用场景中仍具有显著吸波优势^[24]。考虑到它是不带结构的均匀材料,可以谋求与面积较小的旋翼一体化设计。为简化计算,将其加载在直升机旋翼、尾桨表面。

在电磁波垂直入射条件下,FGM-125仿真及实测的反射系数与吸波率如图11所示。可以看出,反射系数小于-10 dB,吸波率高于90%的频率范围从2.6 GHz延伸至12 GHz,覆盖S、C、X波段。图12给出了大角度入射下TE和TM两种极化的反射系数,由于磁性材料是均匀的介质,在大角度入射的情况下,FGM-125的反射系数变化很小。

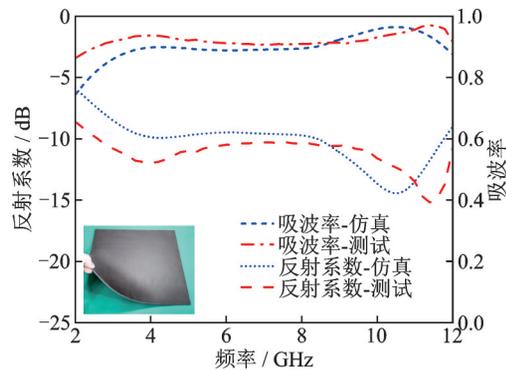


图11 磁性吸波材料FGM-125反射系数及吸波率仿真与测试结果对比

Fig.11 Simulated and measured reflection coefficient and absorption rate of magnetic wave-absorbing materials FGM-125

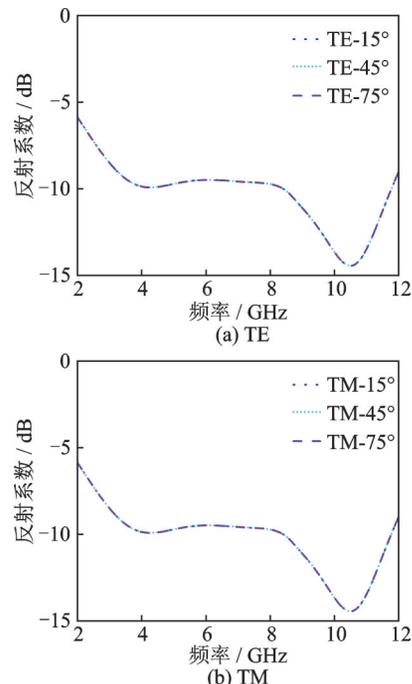


图12 磁性吸波材料在斜入射下仿真的反射系数

Fig.12 Simulated reflection coefficients of magnetic wave-absorbing materials under oblique incidence

随后,用蓝色标记电磁超构吸波体等效模型,并将它覆盖直升机鼻锥前部、侧向、尾追平尾等部位,前窗部位虽为强散射源但由于材料的非透明性故而不加载此处。用绿色标记磁性吸波材料 FGM-125,将其覆盖旋翼、尾追的尾桨部位。隐身材料加载强散射源后的直升机计算模型如图 13 所示。



图 13 隐身材料加载直升机强散射源

Fig.13 Helicopter strong scattering sources loaded with stealth materials

3.2 单站 RCS 缩减

借用 CST 微波工作室进行单站 RCS 的仿真,为了说明吸波材料的宽带隐身效果,从 S、C、X、Ku 波段各取 1 个仿真频点进行单站 RCS 缩减分析,选择计算 3、6、10 和 13 GHz 处直升机强散射源加载隐身材料前后航向姿态、俯仰姿态、滚转姿态的单站 RCS,每个频点选择一种姿态展示,TE 波(垂直极化)入射的结果如图 14 所示, TM 波(水平极化)入射的结果如图 15 所示。

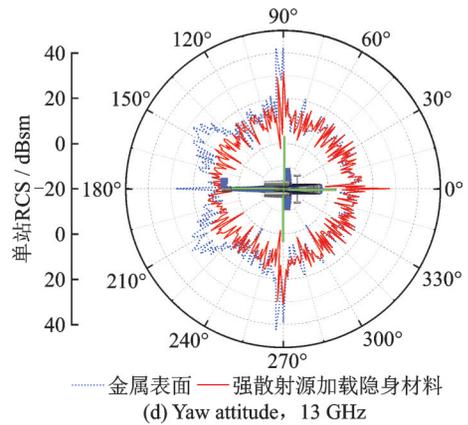
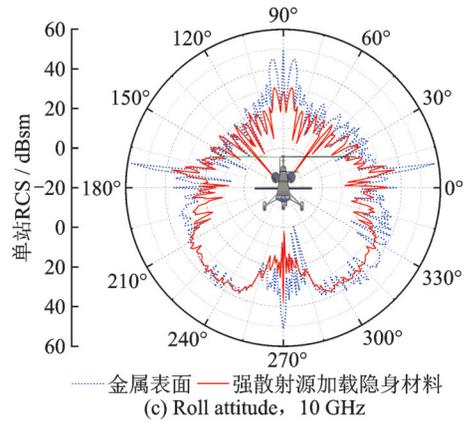
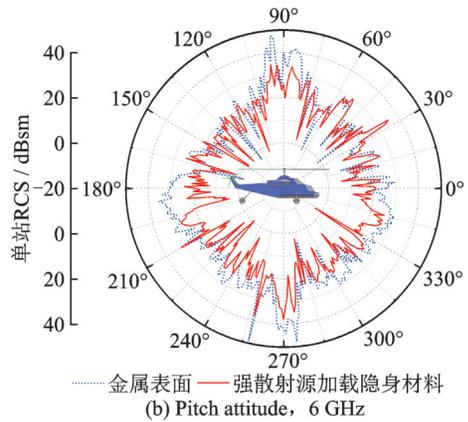
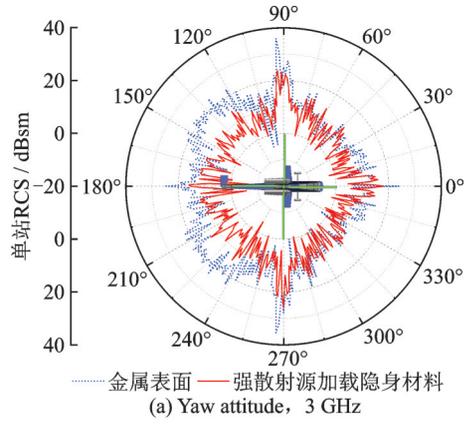
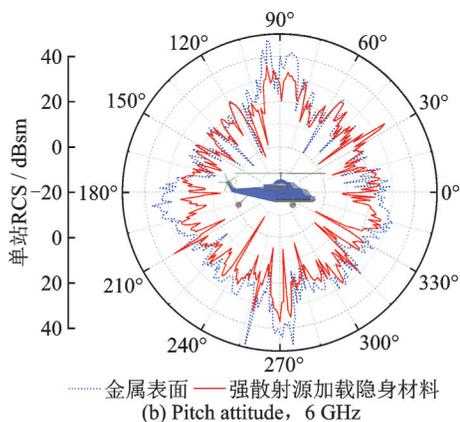
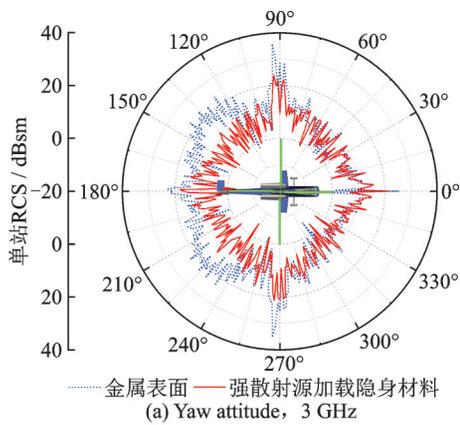


图 14 垂直极化下直升机强散射源涂敷隐身材料前后单站 RCS 对比

Fig.14 Comparison of mono-station RCS of helicopter strong scattering source before and after applying stealth material for a plane wave with vertical polarization



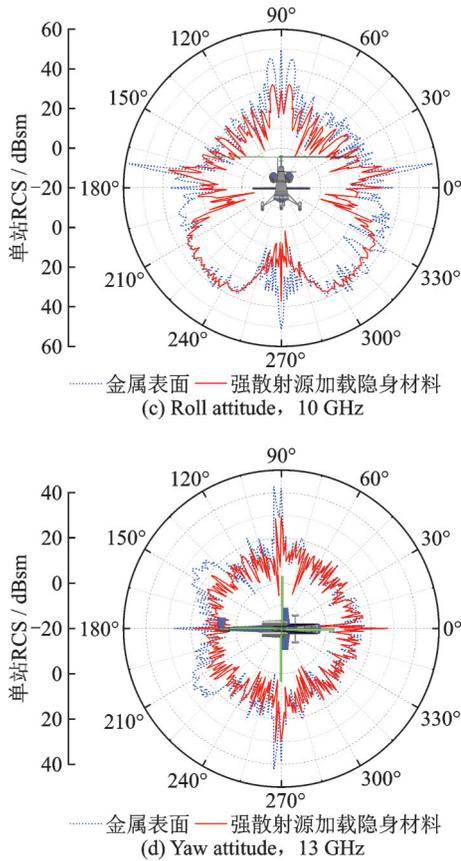


图15 水平极化下直升机强散射源涂敷隐身材料前后单站RCS对比

Fig.15 Comparison of mono-station RCS of helicopter strong scattering source before and after applying stealth material for a plane wave with horizontal polarization

由图14和图15的单站RCS对比可以看出,直升机强散射源加载隐身材料后各频点的单站RCS相比于加载前均有较明显的缩减,特别是在强散射源及其角域范围内缩减更加突出。例如在TE波(垂直极化)入射条件下,10 GHz滚转姿态强散射角域在9°、90°、171°和270°方向,单站RCS分别缩减20.54、21.12、20.67和13.19 dB。计算结果表明强散射方位定位准确,两种雷达吸波材料在宽频带内可以有效降低雷达目标的单站RCS,提高直升机的隐身性能。

进一步统计分析各强散射姿态角域范围内,各典型频点的RCS缩减均值。取航向、俯仰、滚转姿态条件下,4个强散射角度在3、6、10和13 GHz处单站RCS的平均值,得到隐身材料加载前后两种极化的单站RCS对比柱状图,如图16和17所示。通过单站RCS均值的缩减比较可以看出,除航向姿态0°和俯仰姿态33°对应的鼻锥未全涂敷及前窗未加载外,吸波材料覆盖强散射源使得绝大多

数强散射角域内RCS均缩减明显。如图16(b)和图17(b)所示,俯仰姿态强散射角度为257°条件下,宽频带范围内RCS平均缩减量均接近15 dB。

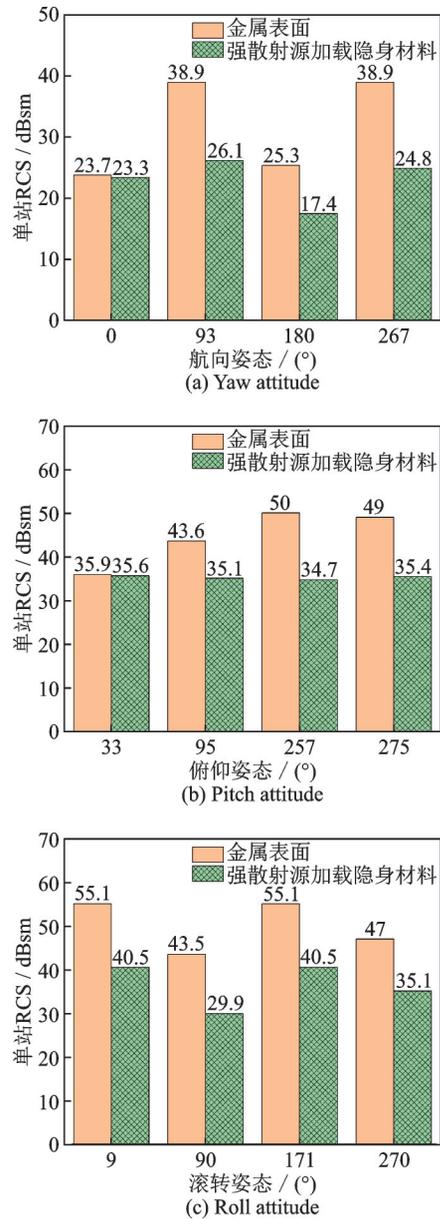
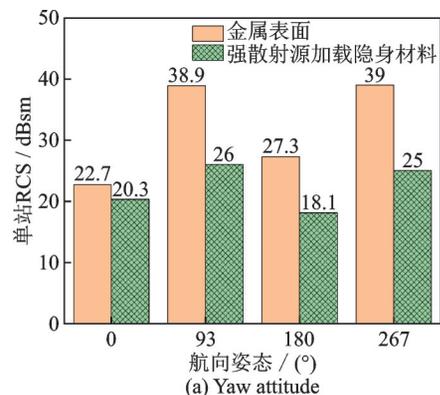


图16 垂直极化下强散射方位处各频点单站RCS均值

Fig.16 Mean values of mono-station RCS at each frequency point for strong scattering angles for a plane wave with vertical polarization



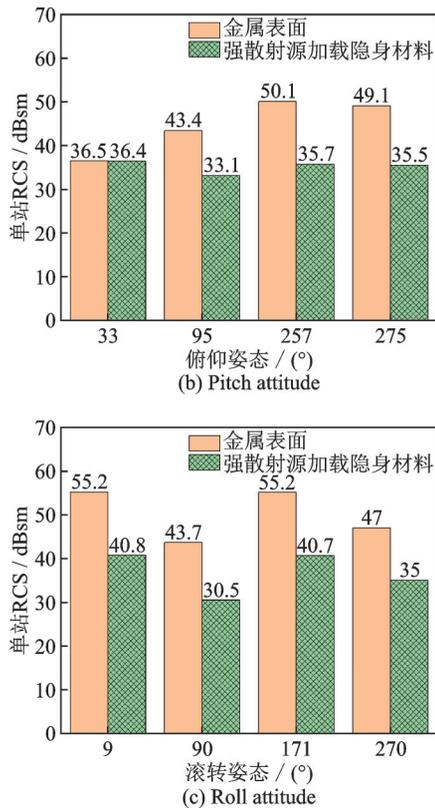


图 17 水平极化下强散射方位处各频点单站 RCS 均值

Fig.17 Mean values of mono-station RCS at each frequency point for strong scattering angles for a plane wave with horizontal polarization

4 结 论

本文针对直升机在雷达频段面临的宽带隐身问题,使用射线追踪法和 ISAR 成像来确定强散射源,将两种宽带雷达吸波材料加载直升机强散射部位分析整机单站 RCS 的缩减。分析结果表明:

(1) 提出利用射线追踪和 ISAR 成像确定直升机强散射源的方法,可以精确、直观地捕捉直升机强散射方位上的强散射源。射线追踪的热点图和 ISAR 成像图追踪雷达目标强散射位置结果高度一致,克服了传统单站 RCS 分析仅给出强散射角域范围、不能精确追踪强散射源的不足。

(2) 电磁超构吸波材料利用等效媒质理论反演介电常数和磁导率,构建等效模型应用于电大尺寸目标 RCS 计算,降低计算资源。仿真计算结果表明,电磁超构吸波材料和同厚度等效模型具有高度一致的反射系数,证明等效模型的构建准确。

(3) 宽带电磁超构吸波材料的性能体现需满足最小周期性,借助等效媒质理论将其应用于鼻锥、侧向等机身面积较大的强散射部位。磁性吸波材料 FGM-125 是超薄且耐高温的均匀材料,直接

涂敷应用于强散射部位的旋翼及尾桨。两款吸波材料加载可使得直升机强散射角域范围内 RCS 缩减明显,宽频带内平均缩减量可达 10 dB 以上。

参 考 文 献:

- [1] 柯军. 美陆军 21 世纪的 RAH-66“科曼奇”武装侦察直升机[J]. 现代兵器, 1997(2): 25-27.
KE Jun. American Army's RAH-66 comanche armed reconnaissance helicopter in the 21st century[J]. Modern Weaponry, 1997(2): 25-27.
- [2] 王莲子, 汪玲, 朱岱寅. 结合迁移学习基于全卷积神经网络的 ISAR 自聚焦算法[J]. 航空学报, 2023, 44(17): 251-262.
WANG Lianzi, WANG Ling, ZHU Daiyin. An ISAR autofocus imaging algorithm based on FCN and transfer learning[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(17): 251-262.
- [3] 费钟阳, 蒋相闻, 招启军. 基于动态 RCS 特征相似的直升机靶机旋翼设计[J]. 航空学报, 2022, 43(7): 152-166.
FEI Zhongyang, JIANG Xiangwen, ZHAO Qijun. Design of helicopter target rotor based on similar dynamic RCS characteristics[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(7): 152-166.
- [4] 陈扬, 招启军, 蒋相闻, 等. 武装直升机雷达散射截面计算及雷达吸波材料影响分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(1): 75-82.
CHEN Yang, ZHAO Qijun, JIANG Xiangwen, et al. Radar cross section calculation on armed helicopter and effect analyses of radar absorbing material[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(1): 75-82.
- [5] ZHOU Z, HUANG J, WANG J. Compound helicopter multi-rotor dynamic radar cross section response analysis[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 105: 106047.
- [6] 蒋相闻. 直升机气动/雷达隐身特性综合优化设计及应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
JIANG Xiangwen. Integrated optimization design and application on aerodynamic/radar stealth characteristics of helicopter[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [7] 苏东林, 宗国明, 吕善伟. 武装直升飞机雷达散射截面的估算方法[J]. 北京航空航天大学学报, 1994, 20(3): 248-252.
SU Donglin, ZONG Guoming, LU Shanwei. The method of calculating radar cross section of fighting helicopters[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1994, 20(3): 248-252.

- [8] 包晓翔,张云飞,杜晓松.通用直升机雷达散射特性及 RCS 减缩[J].北京航空航天大学学报,2013,39(6): 745-750.
BAO Xiaoxiang, ZHANG Yunfei, DU Xiaosong. Radar scattering characteristics and RCS reduction of utility helicopter[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013,39(6): 745-750.
- [9] SMITH D R, VIER D C, KOSCHNY T, et al. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials[J]. Physical Review E, 2005, 71(3): 036617.
- [10] CHEN X, GRZEGORCZYK T M, WU B I, et al. Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials[J]. Physical Review E, 2004, 70(1): 016608.
- [11] YE D, WANG Z, XU K, et al. Ultrawideband dispersion control of a metamaterial surface for perfectly-matched-layer-like absorption[J]. Physical Review Letters, 2013, 111(18): 187402.
- [12] 余鑫.基于射线追踪法的3D无线信道研究与仿真[D].北京:北京邮电大学,2014.
YU Xin. The research and simulation of 3D wireless channel model based on ray tracing[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [13] XIE Z, XU X. Radar cross section calculations and radar image formations using shooting and bouncing rays [C]//Proceedings of the 6th International Congress on Image and Signal Processing (CISP). [S. l.]: IEEE, 2013.
- [14] DIDASCALOU D, SCHAFFER T M, WEINMANN F, et al. Ray-density normalization for ray-optical wave propagation modeling in arbitrarily shaped tunnels[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(9): 1316-1325.
- [15] LATGER J, MAMETSA H, BERGES A. SPECRAY EM/FERMAT—A new modelling radar approach from numerical models of terrain to SAR images[C]//Proceedings of International Conference on Radar Systems (RADAR). [S.l.]:[s.n.], 2005.
- [16] 殷红成,朱国庆,董纯柱,等.基于自适应射线管分裂的多次反射计算方法[J].系统工程与电子技术, 2013,35(4): 700-706.
YIN Hongcheng, ZHU Guoqing, DONG Chunzhu, et al. Efficient multi-reflection computational method based on adaptive ray tube splitting[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013,35(4): 700-706.
- [17] 陈春红,顾村锋,胡俊,等.空中目标分布式ISAR成像仿真技术研究[J].空天防御,2022,5(1): 12-19.
CHEN Chunhong, GU Cunfeng, HU Jun, et al. Research on distributed ISAR imaging simulation technology of air targets[J]. Air & Space Defense, 2022, 5(1): 12-19.
- [18] 汪玲.逆合成孔径雷达成像关键技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2006.
WANG Ling. Study on key technologies of inverse synthetic aperture radar imaging[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [19] SMITH D R, PENDRY J B, WILTSHIRE M C K. Metamaterials and negative refractive index[J]. Science, 2004, 305(5685): 788-792.
- [20] CUI T J. Microwave metamaterials[J]. National Science Review, 2018, 5(2): 134-136.
- [21] WATTS C M, LIU X, PADILLA W J. Metamaterial electromagnetic wave absorbers[J]. Advanced Materials, 2012, 24(23): 98-120.
- [22] 孔祥鲲,孔令奇,姜顺流,等.电磁超材料在超宽带雷达隐身微小卫星设计中的应用[J].宇航学报,2021, 42(6): 775-782.
KONG Xiangkun, KONG Lingqi, JIANG Shunliu, et al. Application of electromagnetic metamaterials in design of ultra-wideband radar stealth microsatellite [J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(6): 775-782.
- [23] 刘祥萱,陈鑫,王焯军,等.磁性吸波材料的研究进展[J].表面技术,2013,42(4): 104-109.
LIU Xiangxuan, CHEN Xin, WANG Xuanjun, et al. Recent progress in magnetic absorbing materials [J]. Surface Technology, 2013,42(4): 104-109.
- [24] YU Y, LUO G Q, YU W, et al. 3-D frequency-selective resorbed based on magnetic material and meander line[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(11): 7694-7699.

(编辑:孙静)