

一种水基宽带低 RCS 螺旋天线辐射-散射调控方法研究

王夫蔚¹, 王 一¹, 戚会强¹, 李艳艳^{1*}, 贺 晨^{1,2}

(1. 西北大学电子信息学院, 陕西西安 710127; 2. 东南大学移动通信全国重点实验室, 江苏南京 210096)

摘 要: 本文基于天线辐射与散射特性协同控制的思想, 提出了一种水基低雷达截面(Radar Cross Section, RCS)的辐射波束与散射电平可调控螺旋天线设计方法, 旨在同时实现低可观测(Low Observability, LO)与低可截获(Low Probability of Intercept, LPI)的隐身功能。该方法将水介质由传统的填充或损耗介质拓展为兼具辐射调控、散射抑制与重构等功能的结构, 最终实现辐射与散射性能的协同优化。天线以透明树脂封装水介质阿基米德双臂螺旋结构, 利用水的高介电常数实现宽带圆极化辐射, 并借助其高损耗特性有效抑制电磁散射, 同时水的流动性为波束与散射电平的灵活调控提供了实现基础。天线底部加载金属反射板以实现单向辐射, 采用双同轴线平衡馈电, 省略了传统巴伦以降低剖面。天线支持两种馈电模式: 模式1为双端口等幅反向馈电, 模式2与模式3为单端口馈电(向选定单臂注水), 由此分别实现主波束在轴向(0°)与偏轴($\pm 16^\circ$)间的可重构波束调控。实测最大增益为 6.93 dBi, 三种模式轴比带宽均优于 35%, 验证了良好的圆极化辐射与波束重构能力。使天线在满足通信需求的同时可动态调整波束指向, 降低信号被截获概率, 实现 LPI 特性。散射特性方面, 仿真与实测结果表明, 该天线在 1~40 GHz 超宽频带内相比传统天线实现了显著的 RCS 减缩, 最大减缩量可达 30.79 dB, 并在宽入射角范围内保持稳定的散射抑制, 显著提升了平台的 LO 性能。双站 RCS 结果进一步验证了其大角度低散射特性。此外, 通过调节水层厚度可动态辅助调控天线的 RCS 电平与工作频点, 相对带宽在 49.6%~61.1% 间变化, 为应对复杂电磁环境提供了灵活性。本文还分析了水介质损耗对辐射效率的影响及温度变化下的性能稳定性。结果表明, 在不同工作模式、水层厚度及水温(25~75 °C)条件下, 天线辐射效率均保持较高水平, 验证了其工程实用性。实物测试结果与仿真吻合良好, 充分说明了该天线在紧凑结构下协同实现宽带隐身与辐射波束灵活调控的能力。本文方法为同时解决 LPI 与 LO 的隐身难题提供了一种可行的技术方案, 对提升高端装备的电磁隐身与战场适应能力具有一定的意义, 也为未来智能可重构隐身天线设计提供了思路。

关键词: 宽带雷达截面减缩; 电磁隐身; 水基天线; 散射特性调控; 辐射波束可重构; 圆极化

基金项目: 东南大学移动通信全国重点实验室开放研究基金资助课题(No.2025D05); 陕西省创新团队项目(No.2024RSCXTD05)

中图分类号: TN82 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(XXXX)XX-0001-13

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> DOI: 10.12263/DZXB.20260213

A Radiation-Scattering Control Method for a Wideband Low-RCS Spiral Antenna Using an Aqueous Medium

WANG Fuwei¹, WANG Yi¹, QI Huiqiang¹, LI Yanyan^{1*}, HE Chen^{1,2}

(1. School of Electronic Information, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China;

2. State Key Laboratory of Mobile Communications, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: Based on the idea of synergistic control of radiation and scattering characteristics, this paper presents a design method for a water-based spiral antenna with low radar cross section (RCS) and adjustable radiation beam as well as scattering level, aiming to achieve both low observability (LO) and low probability of intercept (LPI) for stealth applications. In this paper, water is no longer used merely as a filling or lossy medium, it is treated as a structural component that integrates radiation regulation, scattering suppression, and reconfiguration, enabling co-optimization of radiation and scattering performance. The antenna is built with an Archimedean two-arm spiral radiator encapsulated in transparent resin and filled with pure water. The high permittivity of water supports broadband circularly polarized radiation, while its high-loss characteristic helps reduce electromagnetic scattering. Meanwhile, the fluidity of water provides a practical means for dynamically controlling the radiation beam and scattering level. A metal reflector is placed at the bottom to achieve unidirectional radiation, and a dual-coaxial balanced feeding scheme is adopted, omitting the conventional balun to reduce the pro-

file. Two feeding modes are implemented: Mode 1 uses dual-port equal-amplitude out-of-phase feeding, while Modes 2 and 3 use single-port feeding with water injected into one selected arm, allowing the main beam to steer between the axial (0°) and off-axis ($\pm 16^\circ$) directions. The measured maximum gain reaches 6.93 dBi, and the axial-ratio bandwidth exceeds 35% in all three modes, demonstrating good circular polarization and beam-reconfiguration capability. This allows the antenna to adjust its beam direction dynamically according to communication requirements, reducing the risk of signal interception and thus achieving LPI. In terms of scattering, simulation and measurement results show that the antenna achieves significant RCS reduction over the 1-40 GHz ultra-wideband compared with conventional antennas, with a maximum reduction of 30.79 dB, while maintaining stable scattering suppression over a wide range of incident angles, significantly enhancing LO performance. Bistatic RCS results further confirm its low-scattering characteristics over large angles. In addition, by adjusting the water-layer thickness, dynamic auxiliary control of the RCS level and operating frequency can be realized, with the relative bandwidth varying between 49.6% and 61.1%, providing extra flexibility in complex electromagnetic environments. The effect of water loss on radiation efficiency and the stability of performance under temperature variation are also analyzed. Results indicate that the antenna maintains relatively high radiation efficiency across different operating modes, water-layer thicknesses, and water temperatures ($25\text{--}75^\circ\text{C}$), confirming its engineering practicality. The measured results agree well with simulations, demonstrating that the proposed antenna successfully integrates wideband stealth performance and flexible radiation-beam control within a compact structure. This method offers a feasible technical pathway for addressing the LPI and LO challenges simultaneously, and may provide some reference for the future design of intelligent reconfigurable stealth antennas.

Keywords: wideband radar cross section reduction; electromagnetic stealth; water-based antenna; scattering control; beam reconfigurable; circular polarization

Foundation Item(s): The Open Research Fund of the National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University (No.2025D05); Shaanxi Provincial Innovation Team Project (No.2024RSCXTD05)

0 引言

随着现代电磁探测技术的飞速发展,雷达系统在探测能力与频率覆盖范围上持续提升,对各类防御平台的隐身性能构成了日益严峻的挑战。一般而言,隐身技术主要涵盖两大目标:低可截获性(Low Probability of Intercept, LPI)与低可观测性(Low Observability, LO)。其中,目标的雷达截面(Radar Cross Section, RCS)是评估其LO性能的关键指标^[1]。较低RCS能显著降低被敌方雷达探测与跟踪的概率,现有研究多侧重于天线RCS减缩,而对辐射与散射特性的协同设计关注相对不足。

目前,天线RCS控制方法主要包括结构设计^[2-3]、隐身材料加载^[4]以及有源/无源抵消^[5]等。近年来,吸波材料、人工电磁结构及超表面技术被广泛用于天线隐身设计^[6-13],但相关方案通常依赖附加谐振单元、多层加载结构或复杂设计过程,存在结构复杂、剖面增加和集成困难等问题。另一方面,基于PIN二极管、变容二极管等器件的可重构方法虽可实现频率、极化或方向图调控^[14-15],但其偏置网络复杂,且可能引入附加损耗,影响辐射性能。因此,如何在保持结构简洁的前提下实现辐射与散射特性的协同调控,仍是隐身天线设计中的关键问题。

近年来,基于材料物理特性调制的替代策略受到关注,如热控^[16-17]与光控^[18]技术,它们凭借系统简

单、易于集成的优势,为天线在频率、极化及方向图等维度的特性重构提供了新途径,从而提升了系统在复杂电磁环境中的适应性与鲁棒性。值得关注的是,水作为一种易于获取且具有独特电磁特性的介质,在天线与隐身领域正展现出重要潜力。将水或水基材料引入天线辐射结构,构成水介质谐振天线^[19-21],不仅可利用水介质对天线等效电磁环境的调节作用,在合理结构设计下实现良好的辐射性能,同时还能借助其固有的高损耗特性对天线结构引起的散射特性进行抑制,从而提升天线的低可观测性。需要指出的是,现有相关研究多集中于水介质对单一辐射维度的调制,或单独利用其损耗特性降低散射,而关于在单一物理孔径内同时实现辐射波束重构与RCS动态调控的研究仍较少,而水的良好流动性与光学透明性为天线辐射与散射特性的动态、可逆调控开辟了新颖而简便的实现途径^[22]。

基于以上分析,本文提出一种面向辐射-散射协同调控的水基低RCS螺旋天线设计方法。该方法将水介质由传统的填充介质或损耗介质,拓展为兼具辐射承载、散射抑制与流体重构功能的多角色介质,并在单一紧凑结构内实现辐射与散射性能的协同优化。为此,本文设计了一款基于水介质的可调螺旋天线。该天线利用螺旋结构获得宽阻抗带宽与轴比带宽;通过对双臂螺旋进行独立馈电,实现了辐射方向图的可重构波束扫描;同时,通过调节水层厚度,实现了对

天线散射特性(RCS电平)的有效动态调控。为验证该设计,我们加工并实测了天线样机。测试结果表明:与传统金属天线相比,该水介质天线在1~40 GHz的超宽频带内可实现显著的RCS减缩,最大减缩量达30.79 dB,同时成功实现了辐射波束在 0° 与 $\pm 18^\circ$ 间的切换以及散射电平的动态调控。本文工作为同时解决LPI与LO的隐身难题提供了一种新颖、高效且具有发展潜力的技术思路,对于提升战机、舰船等高端装备的主动隐身与电磁适应能力具有战略意义,为未来智能可控隐身天线设计提供了重要参考。

1 原理与结构设计

平面阿基米德螺旋天线因其结构紧凑、易于实现圆极化辐射,并具备宽频带、低剖面等优良特性,在通信、雷达及遥感等领域应用广泛。该天线基于自相似性原理设计,展现出显著的非频变特性:其阻抗、方向图与增益在宽频带内保持稳定,辐射性能几乎不随频率变化而明显波动。阿基米德螺旋线的极坐标表达式如式(1)^[23]所示:

$$r = r_0 + a(\varphi) \quad (1)$$

其中 a 为螺旋增长率,决定螺旋线的展开速度。在固定尺寸下 a ,越小则圈数越多,辐射能量更集中,方向图更平滑;但圈数过多将引入较大损耗,导致增益与辐射效率下降。 r_0 为螺旋起始半径,对应缠绕角 $\varphi=0$ 时的位置。缠绕角从起始值 φ_{st} 变化至终止值 φ_{end} ,对应匝数 $n=(\varphi_{end}-\varphi_{st})/2\pi$ 。

在螺旋结构中,电流以行波形式传播并辐射圆极化波。对于任意工作频率,天线存在一个主辐射区域。该区域周长与波长成正比,频率升高时辐射区范围缩小。天线整体周长受下限频率 λ_L 制约,一般不小于 $1.25\lambda_L$;设计直径通常取 $D>1.25\lambda_L/\pi$,以抑制末端反射并兼顾尺寸。内径 d 由上限频率 λ_H 决定,通常小于 $1/4\lambda_H$ 。另一螺旋臂的表达式如式(2)所示:

$$r = r_0 + a(\varphi - \varphi_0) \quad (2)$$

其中, r_0 、 a 、 φ 定义同上, $\varphi_0=\pi$ 。

臂宽一般取 $0.007\lambda \sim 0.01\lambda$ 。为获得稳定的阻抗特性,常采用自补结构设计,即金属部分与非金属部分形状完全对称,互换后结构不变。双臂螺旋天线具有高度对称性,符合自补条件,其输入阻抗理论值明确,便于实现馈电匹配。本文设计保持臂宽与臂间距相等。

双臂阿基米德螺旋天线的辐射波束形态取决于馈电相位关系^[24]:等幅反向馈电时,天线辐射轴向圆极化波束;等幅同向馈电时,辐射锥向波束,最大辐射方向偏离轴线,方位面呈全向特性,适用于移动通信等场景。由于螺旋天线本身为双向辐射,为获得单

向波束并提高增益,通常在其后方加载反射板。

基于以上分析,图1所示为本文提出的水基螺旋天线整体结构。该天线以透明树脂封装水介质螺旋臂,树脂边长 $L=160$ mm,相对介电常数 $\varepsilon_r=2.8$,损耗角正切 $\tan\delta=0.025$ 。水臂末端设有注水孔,底部预留馈电孔。天线工作于2~3 GHz,对应波长 $\lambda_1=100$ mm($f_{min}=2$ GHz), $\lambda_h=150$ mm($f_{max}=3$ GHz)。底部加载金属反射板以增强前向辐射并改善阻抗匹配,其直径大于最大主辐射区尺寸,确保全频段有效反射。采用双同轴线平衡馈电,内导体分别连接两水臂,外导体接金属地板。该馈电结构省略传统巴伦,有利于降低剖面、提高集成度。

主要结构参数如下: $a=4$ mm/rad; $\varphi_{st}=0$; $\varphi_{end}=5.25\pi$ rad; $r_0=5$ mm; $W=6.5$ mm(臂宽); $h_1=7$ mm(水层厚度); $h=12$ mm(总厚度); $d=70$ mm(反射板直径); $h_2=3$ mm(树脂底板厚度)。

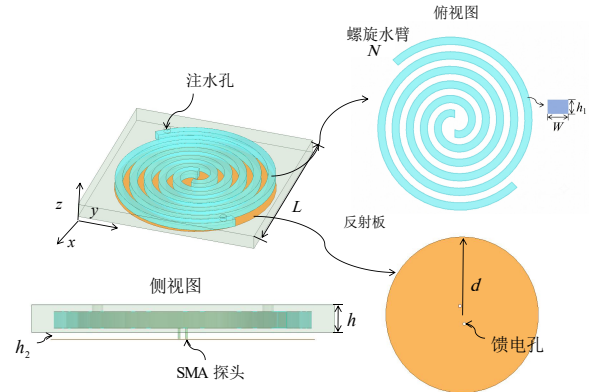


图1 水基螺旋天线的整体结构

Figure 1 Overall structure of a water-based helical antenna

2 辐射特性分析

采用ANSYS Electronics Desktop软件对所设计的水基螺旋天线进行全波电磁仿真并系统评估其辐射性能。为全面分析天线功能,定义了三种工作模式:模式1为双端口等幅反向馈电,对应传统双臂平衡工作状态;模式2与模式3则利用水介质的流动性,通过向选定螺旋臂注水并结合单端口馈电实现,此时天线在电磁特性上等效为两个中心对称分布的单臂螺旋结构。这种基于介质重构的模式切换机制,是本文实现波束可调的关键物理基础。

图2展示了三种模式下的天线表面电流分布。在模式1下,两臂电流幅度相等、相位相反,呈现完美的奇对称分布,共同激励出沿天线轴向(+z方向)的主辐射波束,如图2(a)所示。在模式2与模式3下,仅单臂被激励,电流分布的空间对称性被破坏,导致辐射场型产生横向分量,主波束随之发生偏转,如图2(b)、(c)。

从电磁原理分析,模式2与模式3的辐射方向图应关于天线轴(z 轴)对称,其波束偏转角幅度相等、方向相反,仿真结果与理论预期一致。

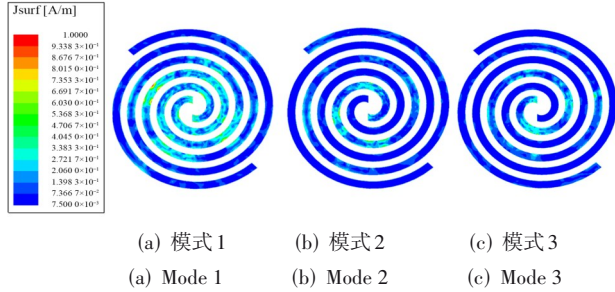


图2 水基螺旋天线表面电流分布
Figure 2 Surface current distribution of a water-based helical antenna

天线的阻抗匹配特性是保障其辐射性能的基础。图3给出了模式1(双端口馈电)下的反射系数曲线。端口1与端口2在1.92~3.59 GHz的宽频带内, S_{11} 均优于-10 dB,且两端口带宽高度重合,证明了馈电网络的良好平衡性与天线结构的对称性,为后续波束调控提供了稳定的馈电条件。

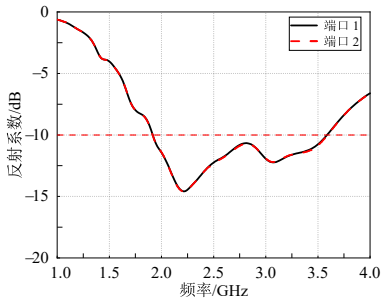


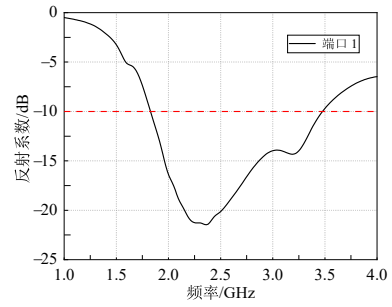
图3 水基螺旋天线模式1的反射系数

Figure 3 Reflection coefficient of mode 1 of the water-based helical antenna

图4所示为单端口工作模式(模式2与模式3)下的反射系数。仿真结果表明,在1.83~3.48 GHz范围内,两种模式的 S_{11} 同样低于-10 dB。与模式1相比,工作带宽略有变化,这源于单臂馈电时天线输入阻抗的微小改变,但整体仍保持了优异的匹配特性,确保了各模式下的辐射效率。

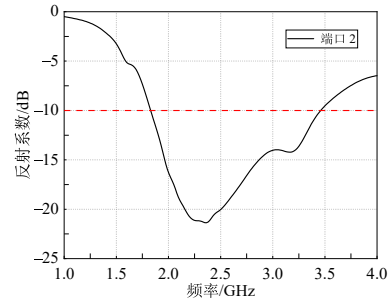
为深入理解天线的工作机理,图5分别给出了2 GHz、2.45 GHz和3 GHz三个特征频点下的表面电流分布。可以观察到明显的频率依赖特性:在低频段(2 GHz),电流分布范围较广,峰值区域位于螺旋臂中后段;随着频率升高(3 GHz),电流逐渐增大且向螺旋臂中前段移动。这一现象印证了阿基米德螺旋天线的“有效辐射区”理论:工作频率与螺旋线上波长约为一个波长的环带区域相对应。

辐射方向图是评估天线空间覆盖能力的核心指



(a) 模式2

(a) Mode 2

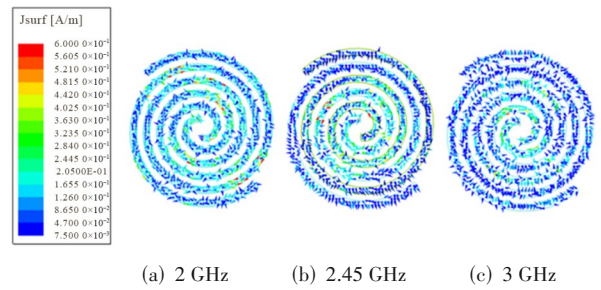


(b) 模式3

(b) Mode 3

图4 水基螺旋天线反射系数

Figure 4 Reflection coefficient of a water-based helical antenna



(a) 2 GHz (b) 2.45 GHz (c) 3 GHz

图5 水基螺旋天线表面电流分布

Figure 5 Surface current distribution of a water-based helical antenna

标。图6(a)~(c)详细对比了三种模式在中心频率2.45 GHz下的仿真方向。

在模式1(双端口等幅反向馈电)下,天线激励出典型的轴向辐射模式,如图6(a)所示。主波束方向为 $\theta=0^\circ$ 、 $\varphi=0^\circ$,最大增益达到6.7 dBi。底部加载的金属反射板有效抑制了后向辐射,前后比优于15 dB,实现了良好的单向辐射特性。需要说明的是,由于水介质的电导率远低于理想金属,其作为辐射体的等效表面阻抗较高,导致辐射效率相较于全金属结构有所下降。然而,仿真结果表明,在所涉及的工作频段内,天线仍能保持稳定的辐射方向和增益,满足实际应用的需求。

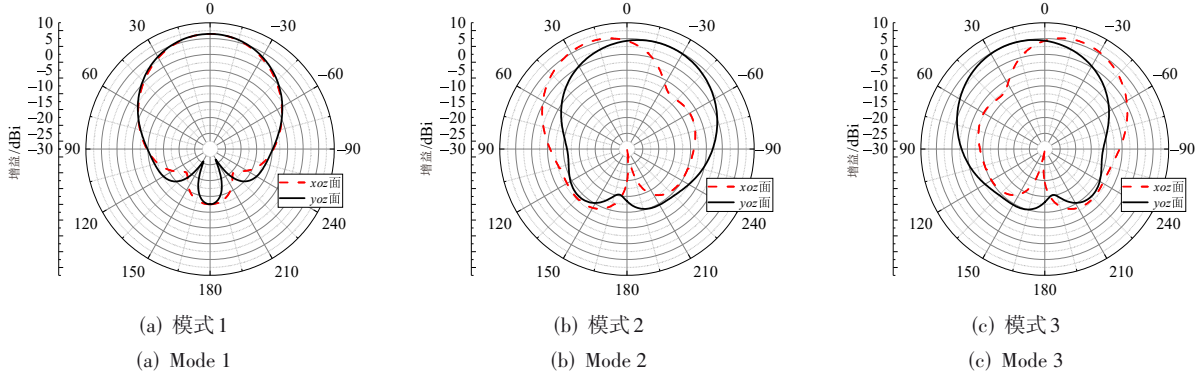


图6 水基螺旋天线辐射方向

Figure 6 Radiation pattern of a water-based helical antenna

在模式2与模式3(单臂馈电)下,天线辐射方向图发生显著改变如图6(b)、(c)所示。主波束从轴向分别向两侧偏转,偏转角约为 $\pm 18^\circ$,与理论预期相符。此时最大增益为5.07 dBi,相较于轴向辐射模式下降约1.6 dB。该增益损失主要源于两个因素:一是仅单臂工作,有效辐射口径减小;二是波束偏离法向导致投影口径效率降低。尽管如此,天线仍保持了较好的方向性,3 dB波束宽度约为 43° ,具备足够的空间覆盖能力。图7展示了水基螺旋天线在三种馈电模式下的辐射方向图对比曲线。通过调整馈电模式,天线可以根据不同的通信需求灵活改变辐射方向,从而提高其在复杂环境下的适应能力。

作为螺旋天线,圆极化纯度是关键性能指标。图8给出了三种工作模式下天线轴比的仿真结果。如图8(a)所示,在模式1下,在2.26~3.28 GHz频段内轴比小于3 dB,相对带宽约为36.8%,最小轴比达到0.13 dB。表明在双臂平衡馈电时,天线能产生纯度极高的圆极化波。图8(b)、(c)所示为在模式2与模式3下,轴比带宽显著拓宽,分别覆盖1.78~3.98 GHz(带宽约76.3%)和1.78~4 GHz(带宽约76.8%),最小

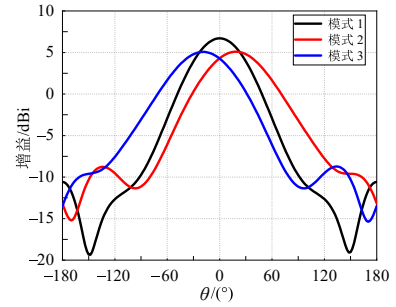


图7 水基螺旋天线不同模式下辐射方向对比

Figure 7 Comparison of radiation patterns of water-based helical antenna under different modes

轴比分别为1.18 dB与1.2 dB。单臂工作模式获得更宽轴比带宽的原因在于其消除了双臂间因幅度与相位偏差引入的极化畸变,使得圆极化特性对频率变化的敏感性降低。这一特性使天线在单端口工作时,能在更宽的频带内满足圆极化应用需求。

综上所述,本文所设计的水基螺旋天线成功实现了辐射方向图的重构。通过简单的馈电网络切换与水介质分布控制,即可实现主波束在轴向(0°)与偏轴

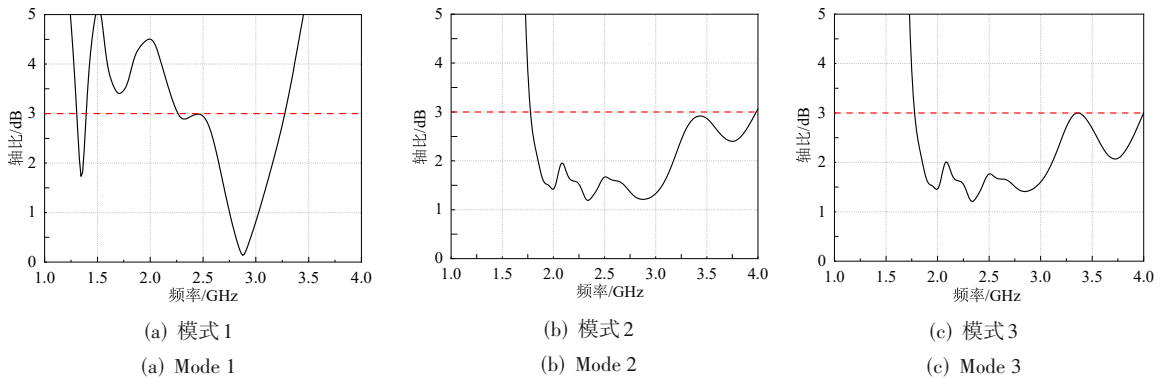


图8 水基螺旋天线轴比

Figure 8 Axial ratio of a water-based helical antenna

($\pm 18^\circ$) 状态间的灵活切换,且各状态均保持了良好的阻抗匹配、定向增益与圆极化特性。这验证了利用水介质实现天线辐射特性动态调控这一核心思想的可行性,为其与散射特性(Radar Cross Section, RCS)的协同调控奠定了坚实基础。

3 散射特性分析

3.1 RCS减缩分析

为全面评估水基螺旋天线的隐身性能,本文对其单站与双站雷达截面进行了仿真分析,并与同频段传统金属微带天线进行对比。参考微带天线的整体结构如图9所示,介质板为介电常数 $\varepsilon_r = 4.4$, $\tan\sigma = 0.0037$ 的 Rogers epoxy 基板,厚度 $h = 1.6$ mm。辐射贴片尺寸 $W_1 = 28.6$ mm, $L_1 = 44$ mm。天线采用同轴探针馈电,底层为金属接地层。该参考天线的地面尺寸与本文所提水基天线的树脂封装边长($L = 160$ mm)完全一致,确保了两者的物理截面积相等,保证了 RCS 减缩效果评价的公平性。

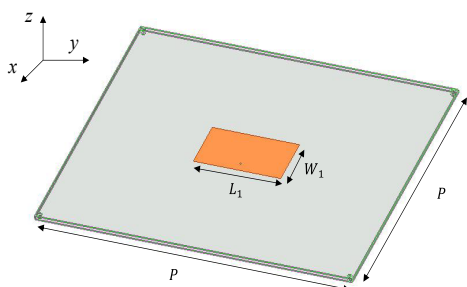
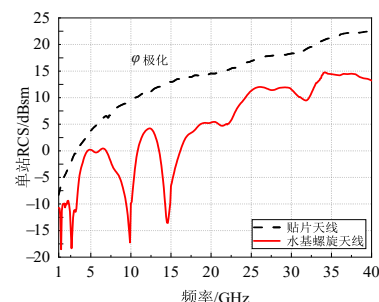


图9 参考微带天线的整体结构

Figure 9 Overall structure of the reference microstrip antenna

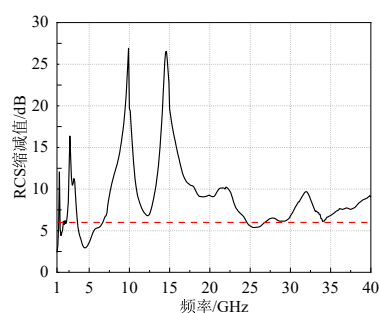
图10所示了频率1~40 GHz范围内,天线在 φ 极化和 θ 极化平面波照射下的单站 RCS 随频率变化曲线。结果表明,该水基天线在宽频带内实现了显著的 RCS 减缩。在 φ 极化照射下,天线在除了个别频带外的其他大部分频带范围内均能实现超过 6 dB 的 RCS 减缩。对于 θ 极化,也可以实现在宽带范围内的 RCS 减缩,该设计得益于水介质的高介电常数与高损耗特性,入射电磁能量被有效吸收并转化为热能,从而显著抑制了后向散射。特别在工作频段(2~3 GHz)内,其 RCS 相较于传统金属微带贴片天线有明显降低。

图11给出了 2.45 GHz、10 GHz 和 20 GHz 三个频点下,单站 RCS 随电磁波入射角度的变化情况(φ 极化)。与传统微带天线相比,水基螺旋天线在 2.45 GHz 处可实现 $\pm 42^\circ$ 宽角域内的 RCS 减缩,最大减缩量可达 10.36 dB;在 10 GHz 处减缩角域扩展至 $\pm 46^\circ$,最大减缩量为 18.5 dB;在 20 GHz 处减缩角域为 $\pm 27^\circ$,最大减缩量为 10.6 dB。上述结果证明,所设计天线在工作



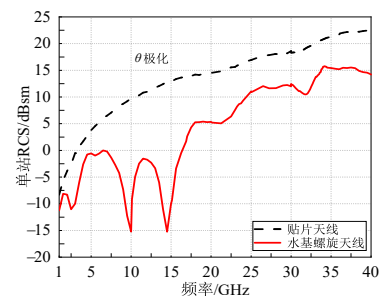
(a) phi极化单站 RCS对比

(a) Comparison of phi-polarized monostatic RCS



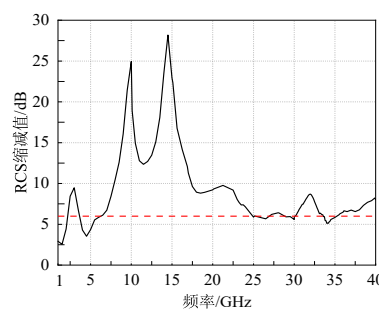
(b) phi极化单站 RCS减缩

(b) phi-polarized monostatic RCS reduction



(c) theta极化单站 RCS对比

(c) Comparison of theta-polarized monostatic RCS



(d) theta极化单站 RCS减缩

(d) theta-polarized monostatic RCS reduction

图10 水基螺旋天线单站 RCS、RCSR 随频率变化示意图

Figure 10 Schematic diagram of monostatic RCS and RCSR of a water-based helical antenna varying with frequency

频段内外均能实现优异的宽角度低RCS特性,具备良好的宽角域低RCS特性。

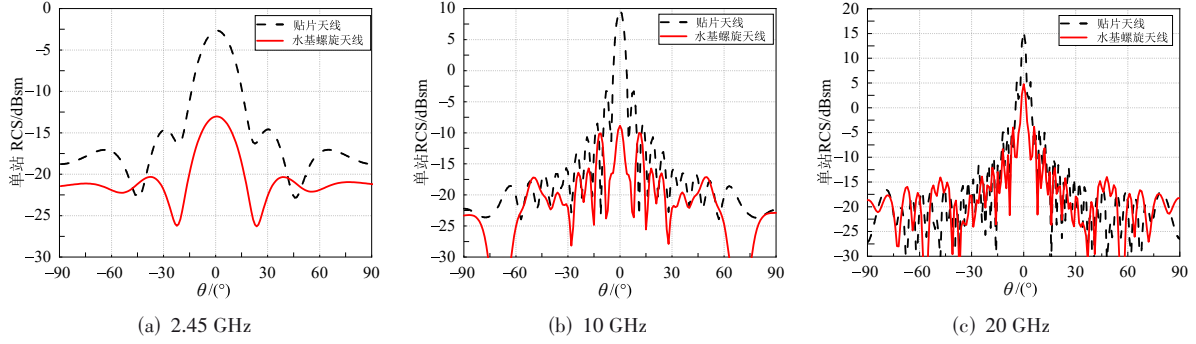


图 11 不同频率下单站 RCS 随角度变化曲线

Figure 11 Curves of monostatic RCS varying with angle at different frequencies

为进一步验证其散射抑制性能,图 12 对比了入射波垂直入射条件下(φ 极化),水基螺旋天线与传统微带天线的双站 RCS 特性对比。结果表明,水基螺旋天线在大角度范围内均表现出优异的低散射特性。具体而言:在 2.45 GHz 处,天线在 $yo\bar{z}$ 面 $\pm 125^\circ$ 角域内

实现最大 10.33 dB 的双站 RCS 减缩,在 $xo\bar{z}$ 面 $\pm 70^\circ$ 角域内实现最大 10.93 dB 减缩;在 10 GHz 处, $yo\bar{z}$ 面 $\pm 100^\circ$ 角域内最大减缩达 18.7 dB, $xo\bar{z}$ 面 $\pm 110^\circ$ 角域内最大减缩达 18.95 dB;在 20 GHz 处, $yo\bar{z}$ 面 $\pm 108^\circ$ 角域内最大减缩达 8.58 dB, $xo\bar{z}$ 面 $\pm 106^\circ$ 角域内最大减缩达 9.39 dB。

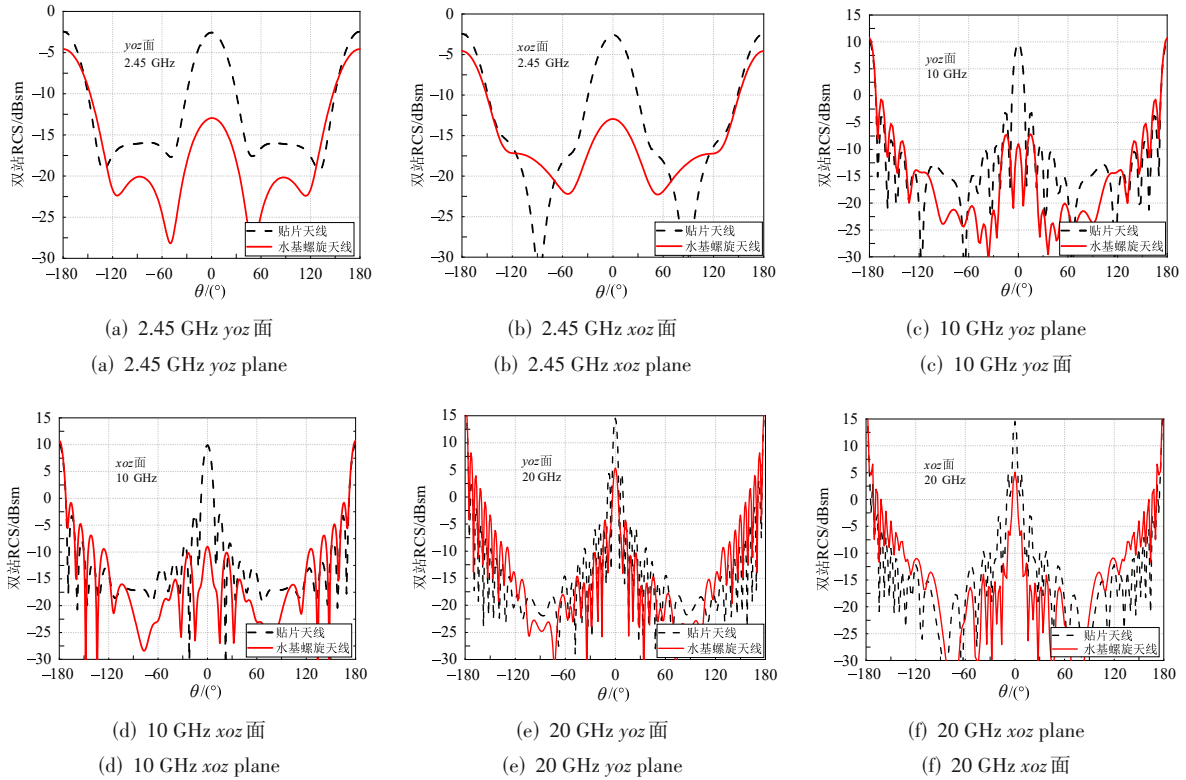


图 12 不同频率下双站 RCS 随角度变化曲线

Figure 12 Curves of bistatic RCS varying with angle at different frequencies

综上,通过对单、双站 RCS 的仿真分析及对比可知,水基螺旋天线在频域和角域上均实现了有效的雷达截面控制,验证了水基螺旋天线在实现低可观测特性方面的显著优势。

3.2 散射特性动态可调

基于前文对水基螺旋天线散射控制特性的分析,本小节将通过调节水层厚度以动态调控天线散射特性,并通过仿真验证其可行性。

图 13 展示了 2.45 GHz 频率下,不同水层厚度(h_1)对应的单站 RCS 仿真结果。当水层厚度为 7 mm 时,垂直入射方向单站 RCS 为 -13.02 dBsm (对应减缩量 10.36 dB);厚度减小至 6 mm 时,RCS 变化为 -11.32 dBsm (减缩量 8.68 dB);厚度调整至 5 mm 时,RCS 也随之改变至 -10.37 dBsm (减缩量 7.73 dB)。可以看出,天线的单站 RCS 特性随水层厚度增加而下降。在实际应用中,毫米级水层厚度的动态控制可以采用在生物化学实验室中常用的步进电机注射泵,来实现对螺旋水臂的精确注水。虽然调节水层厚度引起的 RCS 绝对变化幅度有限,但其作为一种辅助调控手段,可为隐身与电磁伪装应用提供额外的调控灵活性。

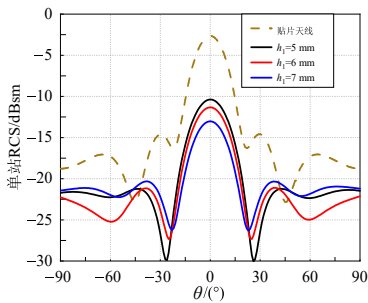


图 13 水基螺旋天线不同水层厚度的单站 RCS

Figure 13 Monostatic RCS of a water-based helical antenna with different water layer thicknesses

值得关注的是,水层厚度变化不仅影响散射特性,也会改变天线的等效电磁参数。水层增厚会提高结构周围的平均介电常数,从而改变螺旋臂中的波传播常数与等效电长度,导致天线谐振频点可能出现略微偏移。图 14 所示为反射系数变化的仿真结果:随着 h_1 从 5 mm 增加至 7 mm,天线 -10 dB 阻抗带宽的低频起点从 2.14 GHz 向低端移动至 1.91 GHz,高频终点在 3.55 GHz 至 3.59 GHz 之间变化,相对带宽从 49.6% 变化至 61.1%。这说明,动态调节水层厚度,会对天线工作频带造成一定影响,但对天线的整体辐射特性影响不大。

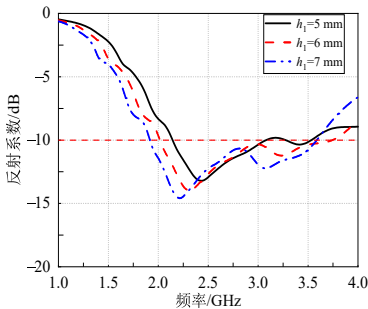


图 14 水基螺旋天线不同水层厚度的 S 参数

Figure 14 S-parameters of a water-based helical antenna with different water layer thicknesses

3.3 辐射与散射之间的平衡分析

为了讨论高损耗水介质对辐射效率的影响,并验证辐射与散射特性的协同平衡能力,本节补充了不同工作模式、不同水层厚度以及水层温度的辐射效率仿真分析。图 15 所示为不同工作模式辐射效率变化曲线:在 2~2.5 GHz 核心频段内,三种工作模式均保持了稳定的辐射效率。模式一由于采用双端口平衡馈电,两臂间的互耦和介质损耗相对均衡,其峰值效率约为 59%。模式二与模式三由于仅单臂被激励且水层分布改变,减少了部分两臂间的电磁耦合损耗,其峰值效率提升至约 63%。最大增益达 6.7 dBi,配合约 60% 的辐射效率,证明该天线在引入损耗介质实现 RCS 减缩的同时,仍具备良好的能量转换能力。

图 16 所示为水层厚度 h_1 对效率的影响:随着 h_1 从 5 mm 增加至 7 mm,效率峰值点由 2.9 GHz 向低频漂移至 2.5 GHz,这与反射系数 S_{11} 的变化规律一致。厚度增大虽导致介质损耗略有上升,但效率仍维持在 59% 以上。根据螺旋天线的有效辐射区理论,电磁波在进入螺旋通道后会迅速通过环带区域辐射至空间。虽然水具有高损耗特性,但在工作频段内,电流路径尚未经过长距离耗散便已完成辐射,从而在实现最大 30.79 dB 的 RCS 减缩的同时,保住了辐射的性能。

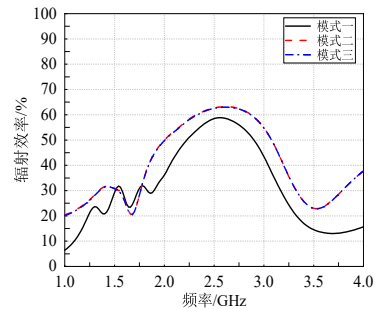


图 15 不同工作模式的辐射效率

Figure 15 Radiation efficiency under different working modes

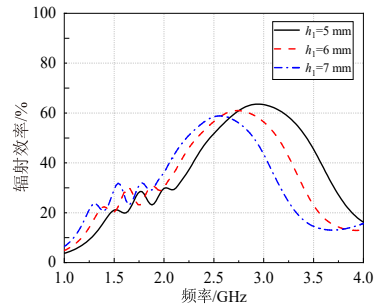


图 16 不同水层厚度的辐射效率

Figure 16 Radiation efficiency with different water layer thicknesses

水层温度 T 是影响水基材料复介电常数的关键因素。为了验证天线在不同热环境下的辐射特性鲁

棒性,图17所示为在不同水温下辐射效率变化曲线:当水温为25℃时,在2.56 GHz处天线的峰值辐射效率约为59%。当水温为50℃时,在2.69 GHz处天线的峰值辐射效率约为70%。当水温为75℃时,在2.82 GHz处天线的峰值效率提升至73%。水的介电损耗具有明显的温度依赖性。在微波频段,随着温度升高,水分子的弛豫时间缩短,导致水的复介电常数虚部减小。因此,高温环境下螺旋臂内的欧姆损耗降低,直接提升了辐射效率。温度升高同样会引起水介电常数实部的减小,使得螺旋结构的等效电长度变短,谐振频点随之向高频漂移。虽然环境温度会改变水的电磁参数,但仿真结果表明,在25℃至75℃的范围内,天线最高仍能保持70%以上的辐射效率。这种特性证明了水基天线在实际的环境下具备良好的辐射鲁棒性。

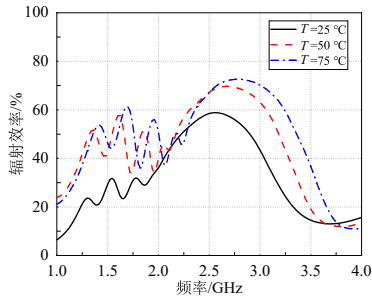


图17 不同水层温度的辐射效率

Figure 17 Radiation efficiency with different water layer temperatures

综上所述,该天线做到了1~40 GHz超宽频带内优秀的雷达截面减缩(最大达30.79 dB),同时在核心工作频段内能保持60%~73%的良好辐射效率。除此之外,辐射效率在不同工作模式、水层厚度及水层温度下均表现出良好的鲁棒性,证明了水基辐射-散射一体化调控方法在复杂环境下的实用性。

4 天线实物与实验验证

为验证前文提出的水基螺旋天线的辐射与散射性能,采用3D打印技术加工了天线样机。天线结构如图18所示:在透明树脂内部雕刻出双螺旋臂通道,并在臂端开设注水孔以支持工作模式切换;天线底部加载铜质反射地板以实现单向辐射。采用同轴探针直接与螺旋臂内的水介质接触的方式进行馈电。为实现阿基米德螺旋天线所需的等幅反向馈电,在测试系统中接入了180°反向3 dB耦合器,其工作原理如图19所示。通过切换耦合器的输入输出端口,可灵活实现对天线双臂的平衡馈电,从而完成不同工作模式下的实验测量。

采用矢量网络分析仪对天线样机的反射系数 S_{11}

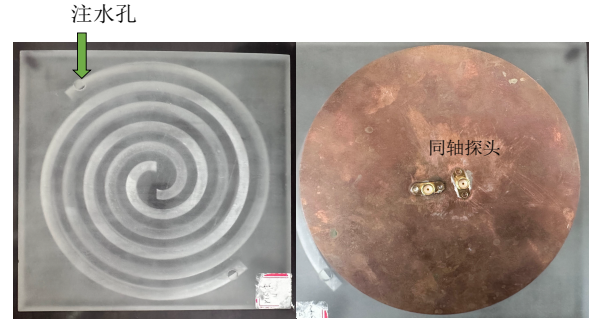


图18 水基螺旋天线样机

Figure 18 Prototype of a water-based helical antenna

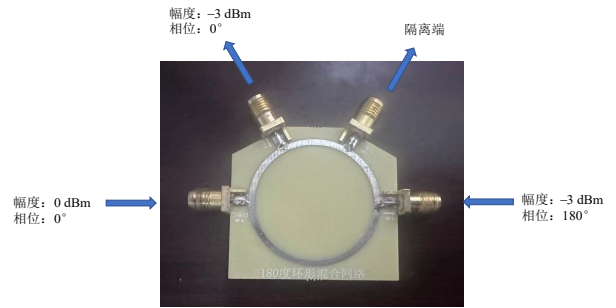


图19 3 dB耦合器

Figure 19 3 dB coupler

进行实测,结果如图20所示。在模式1(双端口平衡馈电)下,实测-10 dB阻抗带宽为1.99~3.39 GHz;在模式2下单端口馈电时,工作频带为2.05~3.46 GHz;在模式3下为1.89~3.69 GHz。实测结果与仿真趋势吻合良好,验证了天线在宽频带内具有稳定的阻抗匹配性能。实测与仿真之间存在的轻微频偏及带宽差异,主要源于3D打印的尺寸公差以及测试环境中的杂散耦合所造成的。

图21对比了三种馈电模式下天线在2.45 GHz处的实测辐射方向。在模式1下,测得最大增益为6.93 dBi,波束指向天线切面法向(0°)。在模式2与模式3下,最大增益分别为5.29 dBi与5.67 dBi,主波束发生偏转,实测偏转角约为 $\pm 16^\circ$,3 dB波束宽度约为 $\pm 34^\circ$ 。实测方向图形状及波束指向与仿真基本一致,验证了天线通过馈电模式切换实现辐射波束调控的能力。

图22给出了三种模式下天线的实测轴比曲线。模式1在2.45~3.45 GHz内轴比小于3 dB;模式2在2.1~3.54 GHz内满足轴比小于3 dB;模式3的对应带宽为2.34~3.4 GHz。实测轴比带宽与仿真预测基本相符,工作频带内整体呈现良好的圆极化特性。部分频段内轴比的微小波动主要受测试环境多径效应及加工装配误差影响,但仍在可接受范围内,满足圆极化天线的应用要求。

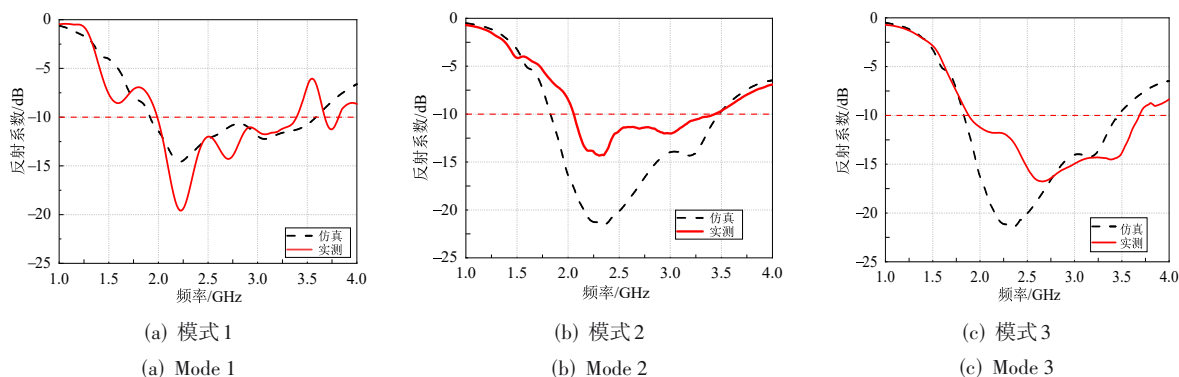
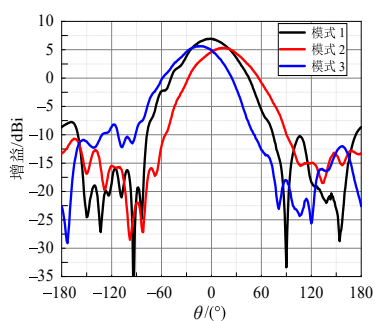
图20 不同模式下水基螺旋天线实测 S_{11} Figure 20 Measured S_{11} of a water-based helical antenna under different modes

图21 水基螺旋天线不同模式实测增益示意图

Figure 21 Schematic diagram of measured gain of a water-based helical antenna under different modes

在微波暗室中采用标准 RCS 测试系统对天线样机的散射特性进行测量。测试使用两个喇叭天线分别覆盖 1~18 GHz 与 18~40 GHz 频段,图 23 展示了测试场景。

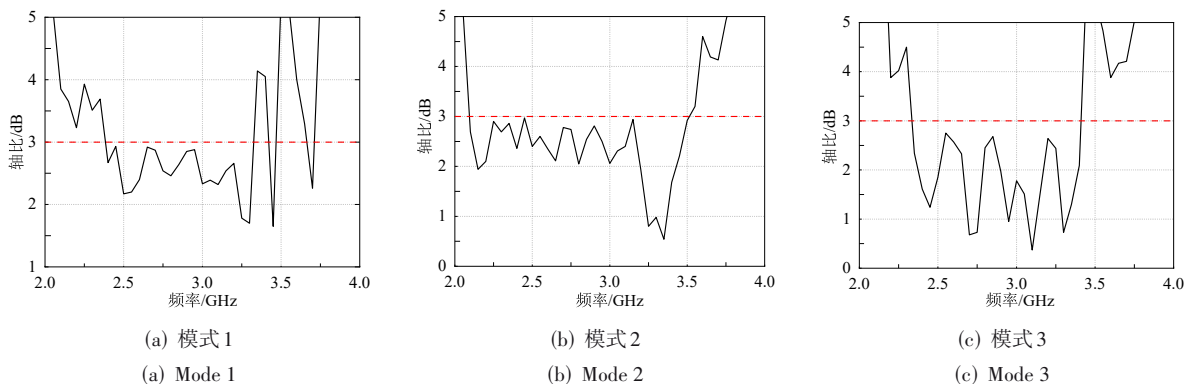


图22 不同模式下水基螺旋天线实测轴比

Figure 22 Measured axial ratio of a water-based helical antenna under different modes

为客观评估本文所提水基螺旋天线的综合性能,表 1 将其与近期报道的多种相关工作进行了对比。总体而言,本文所实现的天线在低剖面、宽阻抗带

图 24 给出了 φ 极化平面波垂直入射条件下,水基螺旋天线与传统金属微带天线单站 RCS 的实测对比。可以看出,在宽频带内,尤其是工作频段附近,水基天线的 RCS 显著低于传统金属天线,证明其通过介质损耗与结构设计有效降低了后向散射,具备良好的宽带隐身性能。实测曲线与仿真趋势一致,高频段的细微差异主要源于暗室背景噪声及注水过程中可能残留的气泡引起的阻抗失配。

图 25 进一步给出了 2.45 GHz、10 GHz 和 20 GHz,单站 RCS 随入射角变化的实测结果。水基螺旋天线在 2.45 GHz 处可实现 $\pm 40^\circ$ 宽角域内的 RCS 减缩,最大减缩量可达 12.77 dB;在 10 GHz 处减缩角域为 $\pm 35^\circ$,最大减缩量为 30.79 dB;在 20 GHz 处减缩角域缩小为 $\pm 20^\circ$,最大减缩量为 10.76 dB;天线在宽角度范围内均表现出稳定的 RCS 减缩效果,与仿真结果高度吻合,验证了其具备应对不同探测角度威胁的能力。

宽、宽轴比带宽等方面展现出综合优势。在雷达截面控制方面,现有研究多通过加载超表面或集成半导体器件(如 PIN 二极管、变容二极管)来实现散射调控或

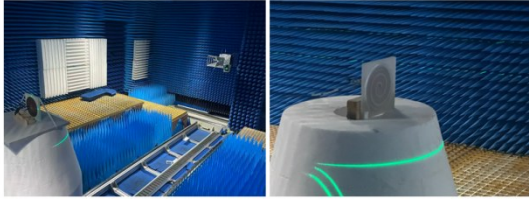


图23 水基螺旋天线单站RCS测试场景

Figure 23 Test setup of monostatic RCS of a water-based helical antenna

频率重构,这些方法往往在提升功能性的同时增加了结构复杂度与设计难度。相比之下,本文提出的水基螺旋天线通过介质集成与流体调控这一新颖途径,在单一结构内协同实现了辐射波束的方向图可重构与散射特性的宽带减缩及动态调控。尤其值得注意的是,通过简单的水层厚度调节,即可在一定范围内动态调制天线的RCS响应与谐振频率,为天线在复杂电

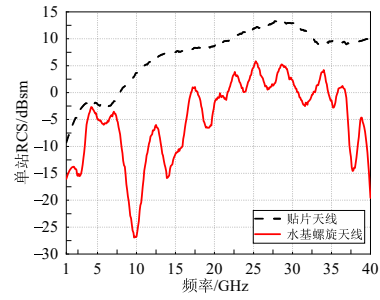


图24 实测水基螺旋天线单站RCS随频率变化曲线

Figure 24 Curve of measured monostatic RCS of a water-based helical antenna varying with frequency

磁环境下的自适应隐身与频率重配提供了一种结构简洁、调控灵活的实现方案。本文验证了基于流体介质实现辐射-散射一体化调控的可行性,为下一代多功能隐身天线的发展提供了新的思路。

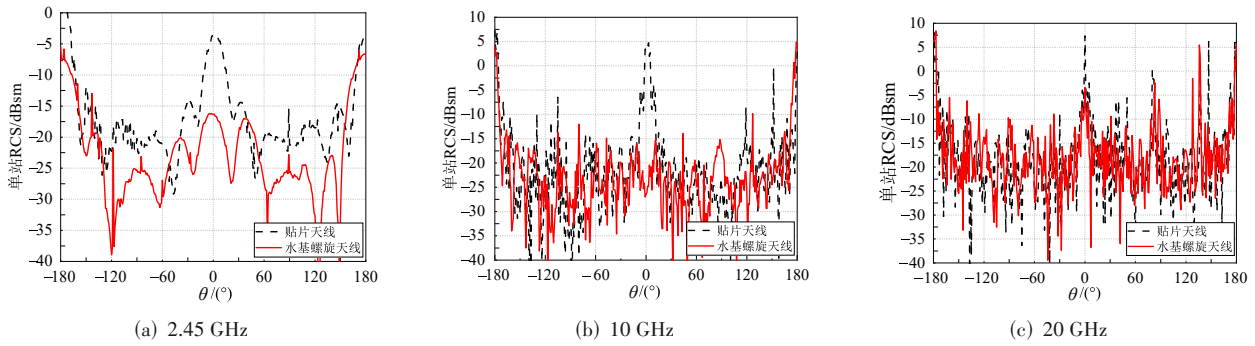


图25 实测不同频率下天线单站RCS随角度变化曲线

Figure 25 Curves of measured monostatic RCS of the antenna varying with angle at different frequencies

表1 相关文献工作对比

Table 1 Comparison of works in relevant literatures

文献	工作频率/GHz	尺寸(λ_0)	材料	增益/dBi	极化	散射减缩/调控	波束调控	调控方式
[19]	2.11~2.65(24.3%)	1.086×1.086	水	5	圆极化	否/否	极化频率	水填充
[21]	5.1~7.8(41.8%)	8×8×0.4	水	10.8/9.5	线极化	否/否	方向图	水填充
[20]	1.2~1.8(40%)	1.5×1.5×0.124	水	8.6	圆极化	否/否	极化	水填充
[14]	4.2~4.55(8%)	1.7×1.7×0.4	金属	6.2	线极化	是/否	方向图	二极管通断
本文工作	1.91~3.77(65.5%)	1.31×1.3×0.123	水	6.93	圆极化	是/是	方向图	水填充

5 结论

本文基于天线辐射与散射特性共同控制的思想,提出并实现了一种新型水基低RCS的辐射波束与散射电平可控螺旋天线。该方法将水介质作为核心功能材料引入阿基米德螺旋辐射结构,通过其独特的电磁与物理特性,在单一平台上同时实现了宽带低可观测与动态低可截获性能。

在辐射方面,天线利用水的高介电常数确保了宽带圆极化辐射特性。通过设计双端口平衡馈电与单

端口非对称馈电两种机制,成功实现了主波束在轴向(0°)与偏轴($\pm 16^\circ$)状态间的电控切换,实测最大增益达6.93 dBi,轴比带宽超过35%,验证了其良好的波束重构能力。这使天线在满足自身通信需求的同时也可动态调整波束指向,降低信号被截获的概率,实现低可截获(Low-Probability of Intercept, LPI)特性。在散射方面,充分利用了水的高损耗特性,将入射电磁能量有效耗散。仿真与实测结果表明:该天线在1~40 GHz超宽频带内,相比传统金属天线可实现显著的雷达截面

减缩,最大减缩量可达 30.79 dB;同时在宽入射角范围内($\pm 20^\circ \sim \pm 40^\circ$)保持稳定的散射抑制,显著提升了平台的低可观测(LO)性能。进一步,通过调节水层厚度,实现了对天线散射电平的动态辅助调控,为应对复杂电磁威胁提供了额外的灵活性。

综上所述,本文通过水介质集成与流体调控这一简洁、新颖的途径,在一个紧凑的低剖面结构内,成功协同了动态波束调控与宽带散射抑制两大功能。实验样机的测试结果充分验证了该方案的有效性与实用性。本文所提出的方法不仅为低可截获与低可观测一体化的多功能隐身天线设计提供了一种富有潜力的实现方案,也展现了流体材料在下一代自适应电磁器件与隐身技术中的广阔应用前景。

参考文献

- [1] Knott E F, Shaeffer J F, Tuley M T. Radar cross section[M]. 2nd ed. Raleigh: SciTech Publishing Inc., 2004.
- [2] Rajesh N, Malathi K, Raju S, et al. Design of Vivaldi antenna with wideband radar cross section reduction[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(4): 2102-2105.
- [3] 王鹏飞, 胡文研, 贾永涛, 等. 一种具有高口径效率和可重构散射特性的圆极化天线阵列设计方法[J]. 电子学报, 2025, 53(8): 2729-2737.
Wang Pengfei, Hu Wenyan, Jia Yongtao, et al. A design method for circularly polarized antenna arrays with high aperture efficiency and reconfigurable scattering characteristics[J]. Acta Electronica Sinica, 2025, 53(8): 2729-2737. (in Chinese)
- [4] 刘博文, 徐航, 张雅婷, 等. 基于石墨烯片的频率可调太赫兹天线[J]. 电子学报, 2024, 52(5): 1421-1431.
Liu Bowen, Xu Hang, Zhang Yating, et al. Frequency tunable terahertz antenna based on graphene sheet[J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(5): 1421-1431. (in Chinese)
- [5] Zhang Hengzhi, Jia Chunyang, Bi Mei, et al. High-temperature resistant electromagnetic protection bilayer structure based on the low-reflection metasurface and wave-absorbing material[J]. Optics Express, 2023, 31(11): 17580-17592.
- [6] Chen Yuhao, Wang Jun, Zhang Bin, et al. One-step preparation of sea urchin-like conducting polypyrrole-modified porous carbonyl iron powders with excellent microwave absorption properties[J]. Materials Research Bulletin, 2024, 175: 112762.
- [7] He Qingqi, Su Jianxun, Qu Meijun, et al. An ultrawideband and ultralow scattering ITO absorber under wide-angle incidences[J]. IEEE Microwave and Wireless Technology Letters, 2025, 35(9): 1324-1327.
- [8] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.
- [9] 李佩弦, 顾鹏飞, 包华广, 等. 基于特征模的宽带高增益超表面天线设计[J]. 电子学报, 2024, 52(12): 3931-3940.
Li Peixian, Gu Pengfei, Bao Huaguang, et al. Design of broadband and high gain metasurface antenna based on characteristic mode analysis[J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(12): 3931-3940. (in Chinese)
- [10] Cheng Youfeng, Yang Lin, Zhong Xuanming, et al. Analysis and design of wideband low-RCS Fabry-Perot antennas with reduced profile[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(9): 7934-7943.
- [11] Shan Hanyu, Jiang Kaijie, Xing Jiangnan, et al. BPSO and staggered triangle layout optimization for wideband RCS reduction of pixelate checkerboard metasurface[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 70(7): 3406-3414.
- [12] Yao Wang, Gao Huotao, Tian Ying, et al. Wideband low-RCS linear polarized array based on miniaturized polarization conversion metasurface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(7): 5663-5674.
- [13] Wang Yanni, Ma Xia, Guo Chenjiang, et al. Ultrawideband and wide-angle RCS reduction of antenna array using dual-layer miniaturized polarization conversion metasurface[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2025, 24(12): 4715-4719.
- [14] Yu Jun, Jiang Wen, Gong Shuxi. Low-RCS beam-steering antenna based on reconfigurable phase gradient metasurface[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(10): 2016-2020.
- [15] Liu Ying, Zhang Wenbo, Jia Yongtao, et al. Low RCS antenna array with reconfigurable scattering patterns based on digital antenna units[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(1): 572-577.
- [16] Zhang Zhipeng, Luo Yao, Yang Hua, et al. Thermal tuning of terahertz metamaterial absorber properties based on VO₂[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2022, 24(15): 8846-8853.
- [17] Chen Fu, Cheng Yongzhi, Luo Hui. Temperature tunable narrow-band terahertz metasurface absorber based on InSb micro-cylinder arrays for enhanced sensing application[J]. IEEE Access, 2020, 8: 82981-82988.
- [18] Fang Junjie, Li Huangyan, Cao Qunsheng, et al. Study of an optically controlled active frequency selective surface[J].

- IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(9): 1707-1711.
- [19] Liu Mengyao, Chen Songmin, Zhao Zitong, et al. A polarization- and frequency-reconfigurable transparent liquid antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(8): 2281-2285.
- [20] Hu Zhenxin, Wang Shiyan, Shen Zhongxiang, et al. Broadband polarization-reconfigurable water spiral antenna of low profile[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1377-1380.
- [21] Ren Zhen, Qi Shishan, Wu Wen, et al. A pattern reconfigurable water leaky-wave antenna with conical beam[C]// 2020 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM). Piscataway: IEEE, 2020: 205-206.
- [22] Zhu Rui, Zhao Yiming, Wang Junhong. A dynamic distilled water horn antenna with low profile and low radar cross section[C]//2023 6th International Conference on Electronics Technology (ICET). Piscataway: IEEE, 2023: 255-260.
- [23] 陈岩. 超宽带平面螺旋天线小型化研究与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
Chen Yan. Research and design of miniaturized ultra-wideband planar spiral antenna[D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)
- [24] Kaiser J. The Archimedean two-wire spiral antenna[J]. IRE Transactions on Antennas and Propagation, 1960, 8(3): 312-323.

作者简介



王夫蔚 男, 1987年6月出生于陕西省西安市。现为西北大学电子信息学院副教授、博士生导师。主要研究方向为雷达截面控制、阵列天线、新材料天线等。中国电子学会会员编号:E190066742M。
E-mail: wfw@nwu.edu.cn



李艳艳 女, 1986年7月出生于山东省济宁市。现为西北大学电子信息学院副教授。主要研究方向为阵列信号处理、目标检测和跟踪。
E-mail: liyanyan@nwu.edu.cn



王 一 男, 2000年3月出生于陕西省榆林市。现为西北大学电子信息学院无线通信技术科研团队硕士研究生。主要研究方向为雷达截面控制、新材料天线等。
E-mail: yiwang129329@163.com



贺 晨 男, 1983年12月出生于陕西省西安市。现为西北大学电子信息学院教授。主要研究方向为智能无线通信与感知。
E-mail: chenhe@nwu.edu.cn



戚会强 男, 2001年6月出生于河南省驻马店市。现为西北大学电子信息学院无线通信技术科研团队硕士研究生。主要研究方向为超材料天线等。
E-mail: 18860275460@163.com