

多模态涡旋电磁波对金属平板目标的近场散射特性研究

汪祠骋^① 赵宇飞^{*②} 杨河林^{*①}

^①(华中师范大学物理科学与技术学院 武汉 430079)

^②(南洋理工大学电气与电子工程学院 新加坡 639798)

摘要: 携带相互正交的轨道角动量(OAM)的多模态涡旋电磁波由于其特殊的幅相特性在通信及雷达领域受到了广泛关注。该文研究了金属目标在近场条件下的多模态涡旋波散射特性。首先,基于环形孔径辐射理论,构建多模态涡旋波入射场模型,利用物理光学法(PO)推导了理想导体圆板的近场散射场。其次定量分析了目标纵向距离、横向位移、几何特征及模态组合参数(起始模态、模态间隔、模态数量)对散射特性的调控规律,并计算了多模态近场涡旋雷达散射截面(NORCS)。研究结果表明相比平面波入射,多模态波束相干叠加后携带了更丰富的空间特征信息。目标对高阶模态能量的截获效率随传播距离增加显著下降;目标的横向位移会引发显著的模态谱串扰,但利用空间位置互补性,通过散射场的矢量叠加可实现目标原始散射特征的有效重构;目标几何形状在尺寸与主瓣相当时会对散射场产生精细调制,随着目标尺寸增大几何形状对散射场的调制作用逐渐减弱。理论计算与仿真结果吻合良好,主模态纯度偏差小于0.0207,散射场幅度分布的均方根误差为0.054,验证了理论的准确性。该研究揭示了多模态涡旋波与目标的相互作用机理,可为未来多模态涡旋雷达系统的目标识别与成像设计提供理论支撑。

关键词: 轨道角动量; 涡旋电磁波; 物理光学法; 雷达散射截面; 近场散射

中图分类号: TN82

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2026)x-0001-11

DOI: 10.12000/JR25277

CSTR: 32380.14.JR25277

引用格式: 汪祠骋, 赵宇飞, 杨河林. 多模态涡旋电磁波对金属平板目标的近场散射特性研究[J]. 雷达学报(中英文), 待出版. doi: 10.12000/JR25277.

Reference format: WANG Cicheng, ZHAO Yufei, and YANG Helin. Near-field scattering characteristics of metallic plate targets by multi-mode vortex electromagnetic waves[J]. *Journal of Radars*, in press. doi: 10.12000/JR25277.

Near-field Scattering Characteristics of Metallic Plate Targets by Multi-mode Vortex Electromagnetic Waves

WANG Cicheng^① ZHAO Yufei^{*②} YANG Helin^{*①}

^①(College of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

^②(School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore)

Abstract: Multimode vortex electromagnetic waves, which carry mutually orthogonal Orbital Angular Momentum (OAM), have attracted extensive research interest in communications and radar systems due to

收稿日期: 2025-12-24; 改回日期: 2026-03-07; 网络出版: 2026-04-14

*通信作者: 杨河林 emyang@ccnu.edu.cn; 赵宇飞 yufei.zhao@ntu.edu.sg

*Corresponding Authors: YANG Helin, emyang@ccnu.edu.cn; ZHAO Yufei, yufei.zhao@ntu.edu.sg

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(CCNU25ai042), 国家留学基金(202506770045)

Foundation Items: The Special Fund for Basic Research of Central Universities (CCNU25ai042), The Program of China Scholarship Council (202506770045)

责任编辑: 刘康 Corresponding Editor: LIU Kang

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

their unique amplitude and phase characteristics. This study investigates the near-field scattering characteristics of metallic plate targets under the incidence of multimode vortex electromagnetic waves. First, an incidence model for multimode vortex waves is constructed based on annular aperture radiation theory, and the near-field scattering field of a perfect electric conductor circular plate is derived using the Physical Optics (PO) method. Subsequently, the effects of target longitudinal distance, transverse displacement, geometric features, and mode combination parameters (initial mode, mode interval, and number of modes) on the scattering characteristics are quantitatively analyzed, and the multimode Near-field OAM Radar Cross Section (NORCS) is calculated. The research results demonstrate that compared to plane wave incidence, the coherent superposition of multimode beams provides richer spatial feature information. The target's efficiency in intercepting high-order mode energy significantly decreases with increasing propagation distance. Although the transverse displacement of the target induces substantial mode spectrum crosstalk, the original scattering features can be effectively reconstructed through vector superposition of scattering fields at symmetrical positions by exploiting spatial complementarity. Furthermore, the geometric shape of the target produces fine modulation on the scattering field when its size is comparable to that of the main lobe, and this modulation effect gradually diminishes as the target size increases. The theoretical calculations closely align with the simulation results, showing a main mode purity deviation of less than 0.0207 and a root mean square error of 0.054 in the scattering field amplitude distribution, thus verifying the accuracy of the theory. This study reveals the interaction mechanism between multimode vortex waves and targets, providing theoretical support for target recognition and imaging system design in future multimode vortex radar systems.

Key words: Orbital Angular Momentum (OAM); Vortex electromagnetic waves; Physical Optics (PO); Radar Cross Section (RCS); Near-field scattering

1 引言

电磁涡旋波作为一种具有特殊螺旋相位波前的电磁波束,自从1992年荷兰科学家Allen等人^[1]证实拉盖尔-高斯光束携带有轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)以来,涡旋波便因为其独特的幅度相位特性及模态正交特性受到广泛关注。在空间域上,携带OAM的涡旋电磁波具有 $\exp(jl\varphi)$ 形式的螺旋相位因子(其中 l 为涡旋波的模态数, φ 为方位角),幅度沿径向分布满足贝塞尔函数关系,因而呈现出中心零陷结构;在模态域上,得益于不同OAM模态在理论上的正交完备性,引入OAM维度能够提升信道容量及频谱效率。凭借这些特性,涡旋波在通信系统^[2-4]、雷达成像^[5-7]、量子信息^[8]等前沿领域展现出了巨大的应用潜力与价值。由于其携带平面波所不具有的OAM,利用涡旋波与目标作用时产生的散射特性,为目标的检测与识别提供了新的物理自由度。

针对新型的涡旋电磁波雷达的散射特性,国内外学者已开展了广泛研究,Liu等人^[9]在2018年首次定义了涡旋波雷达散射截面(OAM Radar Cross Section, ORCS),推导了远场条件下金属板与圆柱体ORCS的解析解,并与传统RCS进行了比较分析。文献^[10]分析了高斯涡旋波束对理想导体球的散射特性;文献^[11]进一步引入电介质板,计算了典型介质目标的散射场;随后不同研究人员分别研

究了涡旋波入射下球形、锥形、叶片模型及箔条云等复杂目标的散射特性^[12-14];文献^[15]系统探讨了贝塞尔幅度项等不同参数对于涡旋电磁波雷达成像分辨率性能的影响;文献^[16]针对涡旋波束的近场散射环境,结合角谱展开理论与物理光学法(Physical Optics, PO),求解了贝塞尔涡旋波波束入射三维导体目标的近场电磁散射场。

尽管现有散射特性研究已涵盖了多种目标与场景,但大多数研究主要集中在单模态涡旋波激励条件,尚未充分挖掘涡旋波模态正交潜能。多模态涡旋波通过对模态组合参数(如模态数量、间隔及权重)的灵活设计,能够实现对涡旋波波束和模态谱灵活调控^[17-19]。由于其能携带相比平面波、单模态涡旋波更丰富的幅度与相位信息,多模态涡旋电磁波近场散射特性的研究在近场超分辨成像^[20]、引信探测^[21]以及针对舰船等大尺寸目标的近场散射机理分析^[22,23]等领域均具有潜在应用价值。本文提出了一种多模态涡旋波近场散射特性分析方法。首先,基于环形孔径辐射理论与天线阵列理论构建了多模态涡旋波的入射场模型,利用PO算法获取目标表面的感应电流并求解涡旋波散射场。基于上述研究,本文定量分析了空间位置与模态参数的调控规律,探究了横向位移下的特征重构机理及目标几何边界的调制效应,并计算了近场涡旋波雷达散射截面(Near-field OAM Radar Cross Section, NORCS)。

该研究成果可为未来多模态涡旋雷达系统的设计提供理论支撑。

2 理论方法

2.1 多模态涡旋波入射场

常见的产生电磁涡旋波的方法有螺旋相位板 (Spiral Phase Plate, SPP)、均匀环形阵列天线 (Uniform Circular Antenna, UCA) 及超表面阵列等^[24-26]。尽管物理形式各异, 其本质均可归结为具有螺旋相位分布的辐射源所产生的电磁场。本文对传播方向沿 $+z$ 轴的多模态涡旋电磁波的辐射源建立如图1所示的环形孔径辐射模型。考虑一个位于 xoy 平面多模态涡旋电磁波的环形辐射孔径, 内径为 R_{in} , 外径为 R_{out} 。孔径上的电场分布 $\mathbf{E}_0(\rho', \varphi')$ 由 N 种不同 OAM 模式叠加而成^[17]:

$$\mathbf{E}_0(\rho', \varphi') = \hat{\mathbf{e}}_x \sum_{n=0}^{N-1} A_n \exp(jl_n \varphi'), \quad R_{in} < \rho' < R_{out} \quad (1)$$

其中, $\hat{\mathbf{e}}_x$ 表示沿 x 轴方向线极化, A_n 为第 n 个模式的幅度, N 为模式总数量, $l_n = l_0 + n\Delta l$ 为对应的模式, l_0 为起始模式, Δl 为模式间隔。通过将环形辐射区域等效为具有空间位置相关性的连续辐射源分布, 利用瑞利-索末菲衍射积分理论, 空间任意点 \mathbf{r}_t 处的多模态 OAM 入射电场可表示为

$$\mathbf{E}^{inc}(\mathbf{r}_t) = \frac{1}{j\lambda} \int_{R_{in}}^{R_{out}} \int_0^{2\pi} \mathbf{E}_0(\rho', \varphi') \frac{e^{-jkR_1}}{R_1} \cdot \cos\theta \rho' d\rho' d\varphi' \quad (2)$$

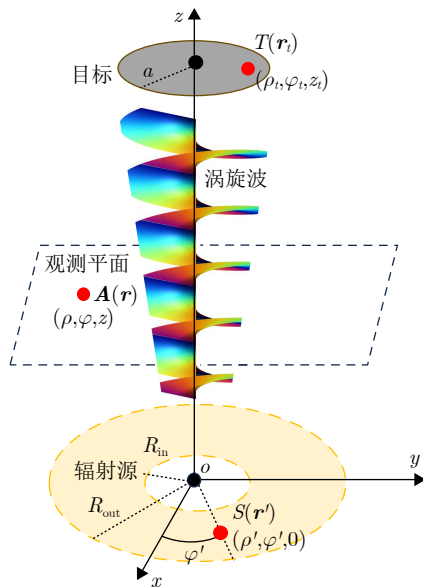


图1 多模态涡旋波辐射模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-mode vortex electromagnetic waves radiation model

其中, $R_1 = |\mathbf{r}_t - \mathbf{r}'|$ 为源点到目标点的距离。当处于菲涅尔近场区域时, 利用泰勒展开到二次项, 并使用贝塞尔积分恒等式, 式(2)可进一步化简为

$$\mathbf{E}^{inc}(\rho_t, \phi_t, z_t) = \hat{\mathbf{e}}_x \sum_{n=0}^{N-1} \psi_n(\rho_t) e^{jl_n \phi_t} \quad (3)$$

$$\psi_n(\rho_t) = \frac{2\pi A_n j^{l_n-1}}{\lambda z_t} e^{-jkz_t} e^{-jk\frac{\rho_t^2}{2z_t}} \int_{R_{in}}^{R_{out}} \rho' e^{-jk\frac{\rho'^2}{2z_t}} \cdot J_{l_n} \left(\frac{k\rho_t \rho'}{z_t} \right) d\rho' \quad (4)$$

其中, $\psi_n(\rho_t)$ 为第 n 个模式在目标处的径向分布函数。由式(3)可知, 经过空间传播后, 多模态涡旋电磁波入射到目标表面时仍保持各模式的涡旋相位特性 $e^{jl_n \phi_t}$, 且各模式之间为线性叠加, 这归因于涡旋波模式之间正交性。多模态模式谱的权重以及涡旋波发散角大小由环形孔径的源分布所决定, 通过调整辐射源不同模式的内径与外径参数能够对多模态涡旋波入射场进行灵活的调控。值得注意的是式(3)具有一般通用性, 当 R_{in} 为0时, 式(3)退化为描述 SPP 等连续孔径产生的电磁涡旋波; 而当对环形积分进行离散化处理时, 则可描述由 UCA 或超表面阵列等离散辐射源所产生的电磁涡旋波; 当不满足近似条件时, 需要使用式(2)进行数值积分计算。

2.2 多模态涡旋波散射场

针对目标的散射场, 假设目标为半径为 a 的理想导体圆板, 中心位于 $(0, 0, z_t)$ 。根据 PO 方法, 当目标表面为理想电导体时, 满足切向电场为零的边界条件。此时, 被照亮区域的表面感应电流密度仅存在于被照亮的区域且由局部切向磁场决定^[27]:

$$\mathbf{J}_s(\mathbf{r}_t) = 2\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}^{inc}(\mathbf{r}_t) \quad (5)$$

$\hat{\mathbf{n}}$ 为目标表面的单位法向矢量。入射磁场 $\mathbf{H}^{inc}(\mathbf{r}_t)$ 可根据麦克斯韦方程由入射电场 $\mathbf{E}^{inc}(\mathbf{r}_t)$ 得出, 代入式(5)可得

$$\mathbf{J}_s(\rho_t, \phi_t) = \frac{2}{\eta} \hat{\mathbf{e}}_x \sum_{n=0}^{N-1} \psi_n(\rho_t) e^{jl_n \phi_t}, \quad 0 \leq \rho_t \leq a \quad (6)$$

其中, η 为自由空间波阻抗。对于空间任意观测点 $\mathbf{r}(\rho, \varphi, z)$, 根据 Stratton-Chu 积分方程, 散射电场可表示为^[28]

$$\mathbf{E}^{sat}(\mathbf{r}) = -\frac{jk\eta}{4\pi} \int_0^a \int_0^{2\pi} \mathbf{J}_s(\rho_t, \phi_t) \frac{e^{-jkR_s}}{R_s} \rho_t d\rho_t d\phi_t \quad (7)$$

其中, $R_2 = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_t|$ 为目标点到观测点的距离。将式(6)代入式(7), 并再次利用菲涅尔近似条件, 积分方程可简化为

$$\mathbf{E}^{\text{sat}}(\rho, \phi, z) = \hat{e}_x \frac{k}{j(z-z_t)} e^{-jk(z-z_t)} e^{-jk \frac{\rho^2}{2(z-z_t)}} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} j^{ln} e^{jln\phi} \cdot \Gamma_n(\rho, z) \quad (8)$$

$$\Gamma_n(\rho, z) = \int_0^a \psi_n(\rho_t) e^{-jk \frac{\rho_t^2}{2(z-z_t)}} J_{ln} \left(\frac{k\rho\rho_t}{Z} \right) \rho_t d\rho_t \quad (9)$$

由式(8)可知, 散射场在方位向上 $e^{jln\phi}$ 仍携带了入射波的模式信息, 但各个模式的权重将由目标表面的感应电流所决定, $\Gamma_n(\rho, z)$ 函数对模式谱进行了进一步调制。这种特殊非均匀幅相分布使得多模式涡旋波在照射目标时, 能够产生与传统平面波显著不同的散射特性, 增加了回波信息, 为目标的特征识别与探测提供了一种新的物理方式。

3 理想导体目标的近场散射特性分析

3.1 理论验证

为验证理论模型的有效性, 本文基于第2节所

述模型, 采用8个贴片天线组成UCA阵列, 天线中心频率为10 GHz, 模态为+2, 与目标距离为0.5 m, 目标为半径0.2 m的理想导体圆板。分别采用PO方法与基于CST电磁仿真软件的矩量法(Method of Moment, MoM)对散射场进行求解。结果如图2所示, 两者在幅值零点位置、主瓣分布及相位螺旋结构上表现出高度一致性。为了定量评估两种算法的吻合度, 本文引入均方根误差与OAM模式纯度^[29]作为统计评价指标。幅度分布的均方根误差RMSE仅为0.0541。模式谱分析显示, 基于PO方法提取的主模式纯度为0.9996, MoM为0.9789, 两者偏差仅为0.0207, 验证了理论模型的有效性。

3.2 目标空间位置对近场散射特性的影响

3.2.1 纵向传播距离对近场散射特性的影响

为探究多模式涡旋电磁波传输距离对目标散射特性的调制作用, 建立了理想导体圆板多模式近场散射模型。中心频率设置为 $f_0 = 10$ GHz, 目标半

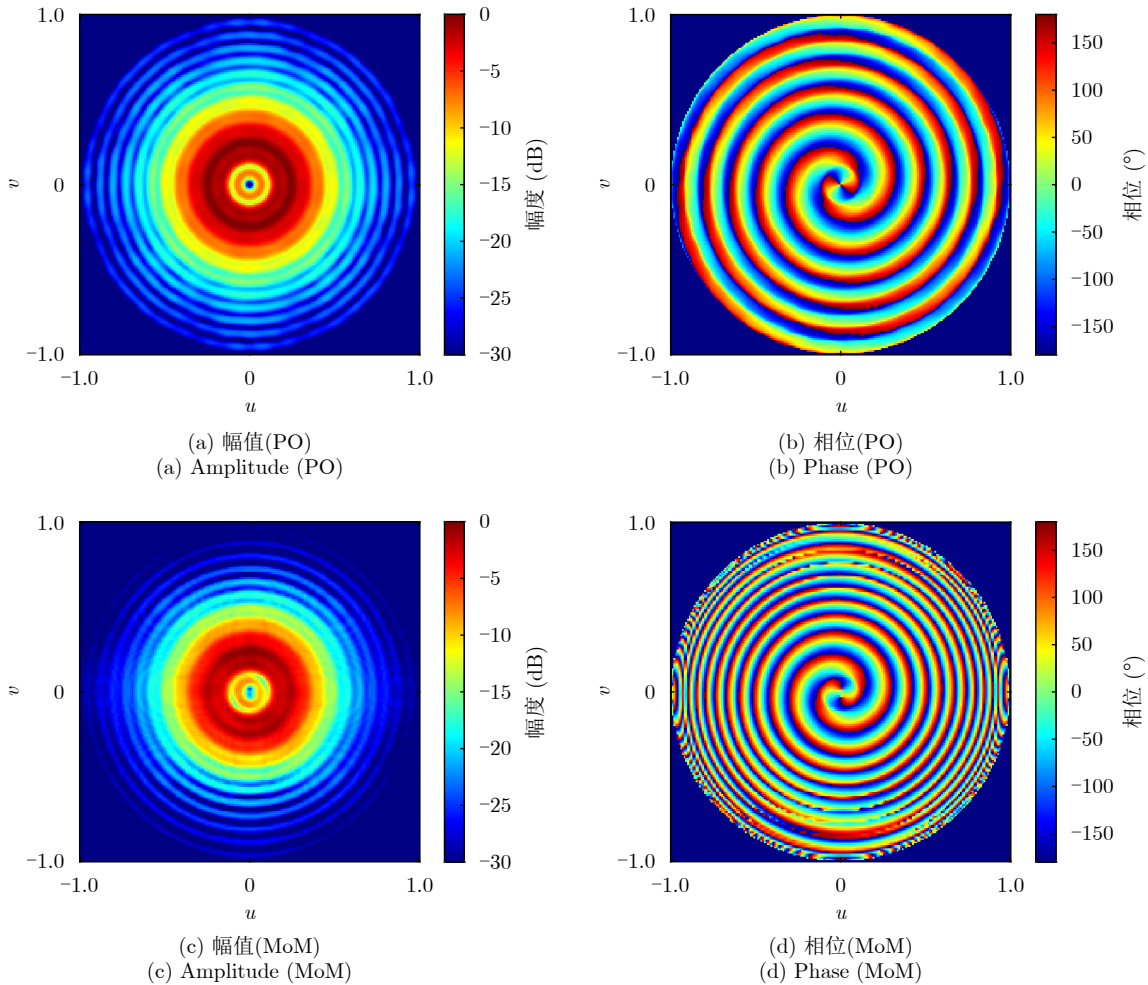


图2 物理光学法与矩量法计算得到的理想导体圆板散射场对比验证

Fig. 2 Validation of the scattered fields from a perfectly conducting circular plate calculated by the PO method and the MoM

径 $a = 0.2 \text{ m}$ ，模态组合设置为起始模态 $l_0 = 1$ ，模态数量 $N = 3$ ，模态间隔 $\Delta l = 2$ ，辐射源与金属目标距离分别为 $x \in \{0.4, 1.2, 5.0\} \text{ m}$ ，设置入射场观测平面与金属目标在同一平面，散射场观测平面与辐射源在同一平面。为不同模态分配不同内径 R_{in} 与外径 R_{est} ，使得涡旋波发散角度保持基本一致。其中发散角定义为涡旋波主瓣最大值方向与传播轴的夹角，具体参数如表1所示。与单一模态涡旋波环形幅度分布不同，多模态波束由于不同模态分量之间的相干叠加，在角向维度上引入了周期性的相位调制，导致入射场呈现具有特定花瓣状结构的各向异性分布。入射场、散射场的幅度与相位结果如图3所示，其中入射场与散射场幅值均已对其各自的最大值进行了归一化处理。

表 1 多模态涡旋波辐射源参数设置
Tab. 1 Parameters of the multi-mode vortex wave radiation source

涡旋波模态	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	发散角($^\circ$)
1	11	64	10.00
3	104	126	9.82
5	169	186	9.78

在近场区域，波束能量高度集中，3种模态由于相干叠加呈现出两个主瓣波束，距离较近时入射场主瓣完全位于目标孔径投影范围(白色虚线)内，随着传播距离增加，由于涡旋波固有的发散特性，入射波束的主瓣超过目标半径，目标仅能响应中心区域的部分能量，携带高阶模态的电磁能量无法被目标有效散射。以散射场幅值最大的位置为半径(黑色虚线)进行模态谱分析，当 $z=0.4 \text{ m}$ 时，受后向散射传播方向反转的影响，散射场模态与入射场互为模态相反数，模态谱包含对应的 $-1, -3, -5$ 模态分量。这是由于目标表面能够截获入射波束的绝大部分能量，感应电流完整复现了入射场的精细结构，因此散射回波较好地保留了多模态干涉特征。随着观测距离的增加，本文研究的理想导体圆板类似于低通滤波器，滤除了多模态涡旋波中的高阶分量，当观测距离大于目标所在平面发散角主瓣 ($R_{\text{obs}} > a / \tan(\theta_{\text{dis}}) = 1.13 \text{ m}$) 时，散射场的高阶模态分量会显著下降，散射场模态谱退化为以基模为主分布。

3.2.2 横向位移对近场散射特性的影响

在实际的近场探测与成像场景中，目标中心往

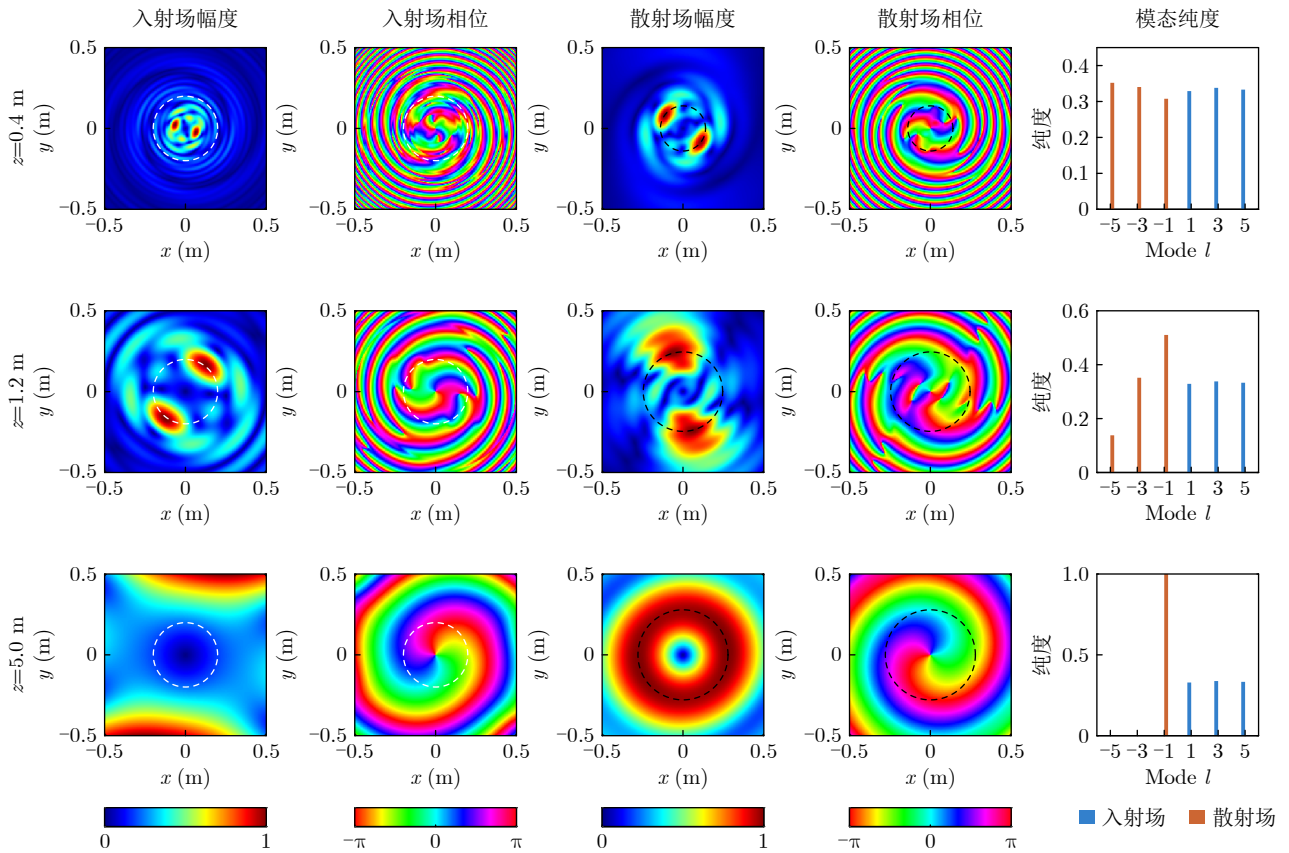


图 3 不同纵向距离下多模态涡旋波入射场与散射场的幅相分布及模态纯度特性

Fig. 3 Amplitude-phase distributions and mode purity characteristics of the incident and scattered fields for multi-mode vortex waves at different longitudinal distances

往难以与涡旋波束的传播轴线完全重合。因此本节定量分析了目标在横向面内沿 x 轴发生位移 Δx 时,近场散射场分布及其模态纯度谱的演变规律,目标半径设置为 $a=0.15$ m,其余设置与3.2.1节一致,仿真结果如图4所示。结果表明,当产生 $\Delta x = \pm 0.15$ m的横向位移后,入射场仅有一个主瓣波束激励目标,对应散射场虽然能够产生一个散射主瓣,但相位奇点偏离中心,最终导致模态谱发生了严重的串扰。值得注意的是,将 $\Delta x = \pm 0.15$ m两个位置的散射场进行矢量叠加,其合成场的相位结构图4(j)与模态谱图4(o)能够重新观察到类似于 $\Delta x=0$ m时的分布特征。

根据电磁场的线性叠加原理,两个对称位置的目標分别截获了多模态波束中互补的空间特征。通过将两者的散射场矢量相加,合成窗口重新覆盖了入射场的主要核心能量区域。因此,空间域信息的

完整性得到了部分恢复,从而在相位上重新呈现出螺旋干涉纹理,并在模态谱中抑制了杂散模态,实现了主模态的有效重构。这一发现表明,利用空间位置的互补性,具备恢复目标原始散射特征的潜力。

3.3 目标几何特征对近场散射的影响

为探究目标几何形状及大小对多模态涡旋波近场散射特性的影响,选取了正方形理想导体平板与圆形平板利用式(7)采用PO数值积分法进行分析。正方形平板的边长设置为 $L = 2a$,圆形平板的半径为 a ,其余参数与3.2.1节设置一致。图5展示了在不同尺寸约束下,两种目标的近场散射幅度分布及其对应的模态纯度谱。当目标尺寸 $a=0.15$ m与入射场主瓣($R_{\text{obs}} > a / \tan(\theta_{\text{dis}}) = 1.13$ m)相当时,两者均呈现出了与入射场一致的双主瓣散射结构。目标的几何形状也对散射场起到一定调制作用。对比图5(a)

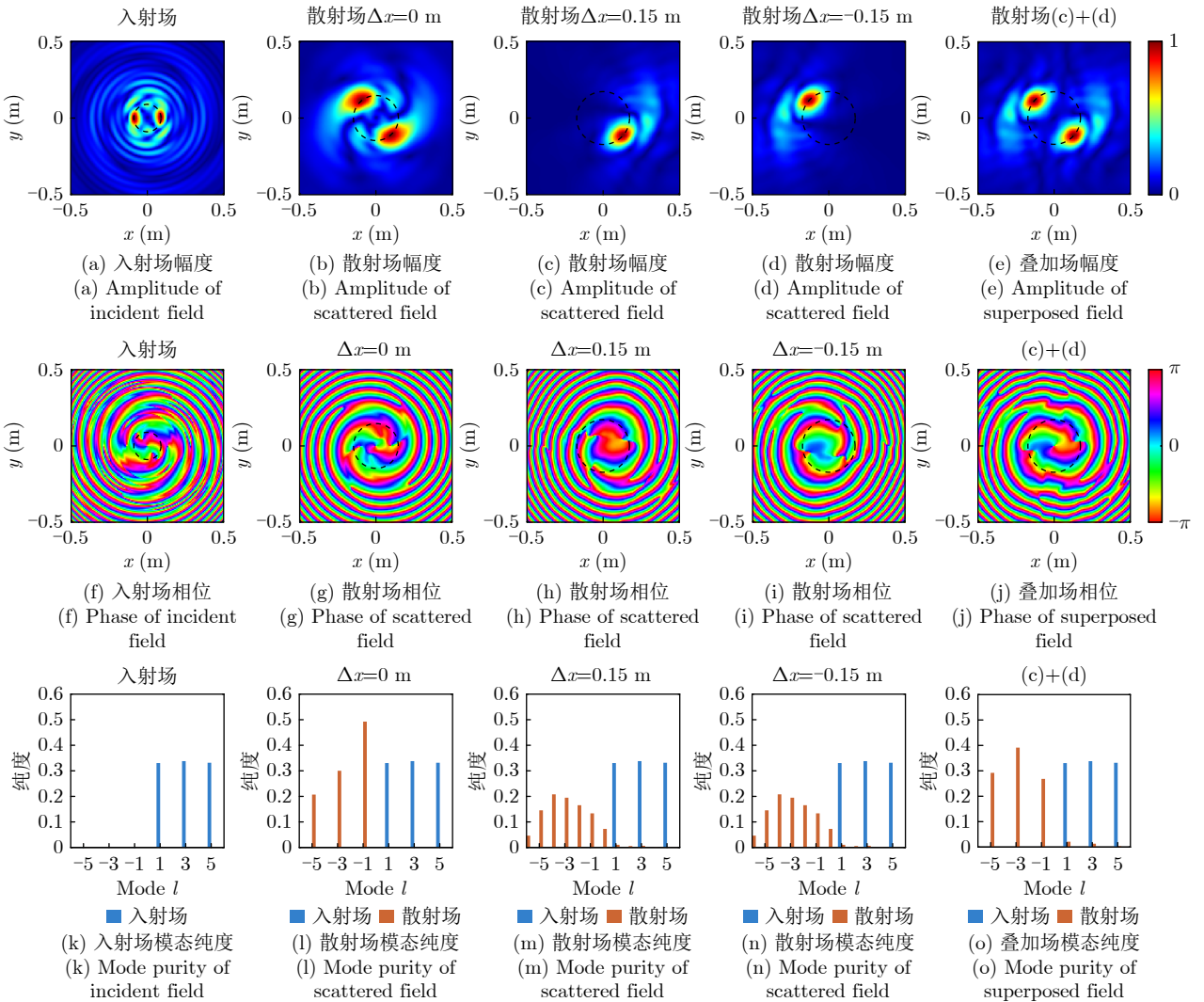


图4 不同横向位移下多模态涡旋波入射场与散射场的幅相分布及模态纯度

Fig. 4 Amplitude-phase distributions and mode purity reconstruction characteristics of incident and scattered fields for multi-mode vortex waves under different lateral displacements

与图5(b)，与圆形相比正方形目标的4个顶角的引入破坏了入射波束的角向对称性，因此散射场与图5(a)存在差异。随着目标尺寸进一步增大直至完全覆盖入射场主瓣时，不同形状目标的散射特性将趋于收敛，形状诱发的模态差异将逐渐被削弱，最终趋近于无限电大平面的镜像反射特性。

3.4 模态组合参数对散射特性的影响

为探究模态组合参数对散射特性的调控作用，本节在保持观测距离 $y = 1.0$ m与圆形辐射场半径均为0.2 m的前提下，对比分析了9种具有不同模态数量 N ，模态间隔 Δl 及起始模态 b_0 的散射场幅度分布，如图6所示，多模态谱分析结果如图7所示。结果表明，入射波束的模态参数对近场散射特性具有显著的调制作用。首先，模态数量 N 主要影响散射场的精细结构，对散射特性以及模态谱分布影响有限，这是由于高阶模态发散角过大，散射目标无法捕捉到高阶模态的幅值与相位信息，导致高阶模态的有效散射截面显著降低。其次，模态间隔 Δl 能够诱导散射场的径向干涉与波束分裂。当保持起始模态不变而增大模态间隔时，散射场的径向包络不再保持单一主瓣形态，而是分裂为多个次级主瓣，在近场呈现出复杂的振荡分布。这是由于不同模态的贝塞尔函数在径向上的零点位置与相位变化率不

同，在目标表面发生相干叠加，导致散射场主瓣分裂，波峰数量与模态间隔呈现正相关特性。最后，起始模态 b_0 是决定散射能量截获效率的关键因素。在入射场中，起始模态在同一模态组合中拥有最小的发散角，在相同辐射孔径下能比其他模态拥有更大的权重。高阶模态入射波束能量主要分布在理想导体圆板的物理孔径之外，这进一步使得起始模态在目标散射特性中起到了决定性因素。

4 多模态涡旋波的近场雷达散射截面

传统雷达散射截面的定义建立在平面波入射假设之上，然而涡旋电磁波具有特殊的螺旋相位及不均匀幅度分布，为了定量描述涡旋电磁波在近场区域的散射特性，验证涡旋波雷达与传统平面波雷达探测中的区别，参考RCS定义^[27,30]，将近场涡旋波雷达散射截面(Near-field OAM Radar Cross Section, NORCS)定义如下：

$$\sigma(\theta, \phi, z) = 4\pi R_{\text{obs}}^2 \frac{|\mathbf{E}^{\text{sat}}|^2}{|\mathbf{E}^{\text{inc}}|^2} \quad (10)$$

其中， \mathbf{E}^{sat} 取在观测点(距离目标 R_{obs} 处)接收到的散射电场强度， \mathbf{E}^{inc} 取入射场在目标表面的最大电场强度，辐射源内径 $R_{\text{in}}=0$ m，外径为 $R_{\text{out}}=0.2$ m，理想导体圆板半径为 $a=0.2$ m。工作频率为10 GHz，结果如图8所示。

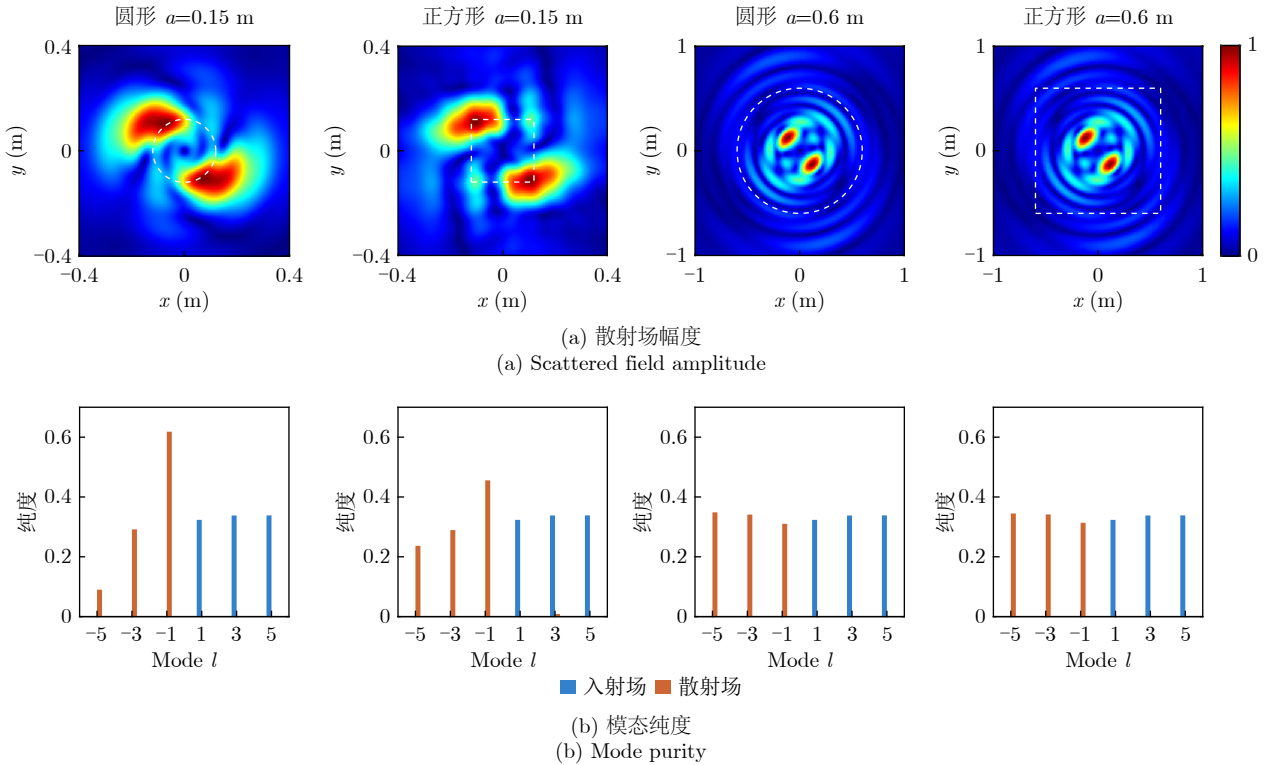


图 5 目标几何特征对近场散射的影响

Fig. 5 Comparison of target geometric features on near-field scattering characteristics

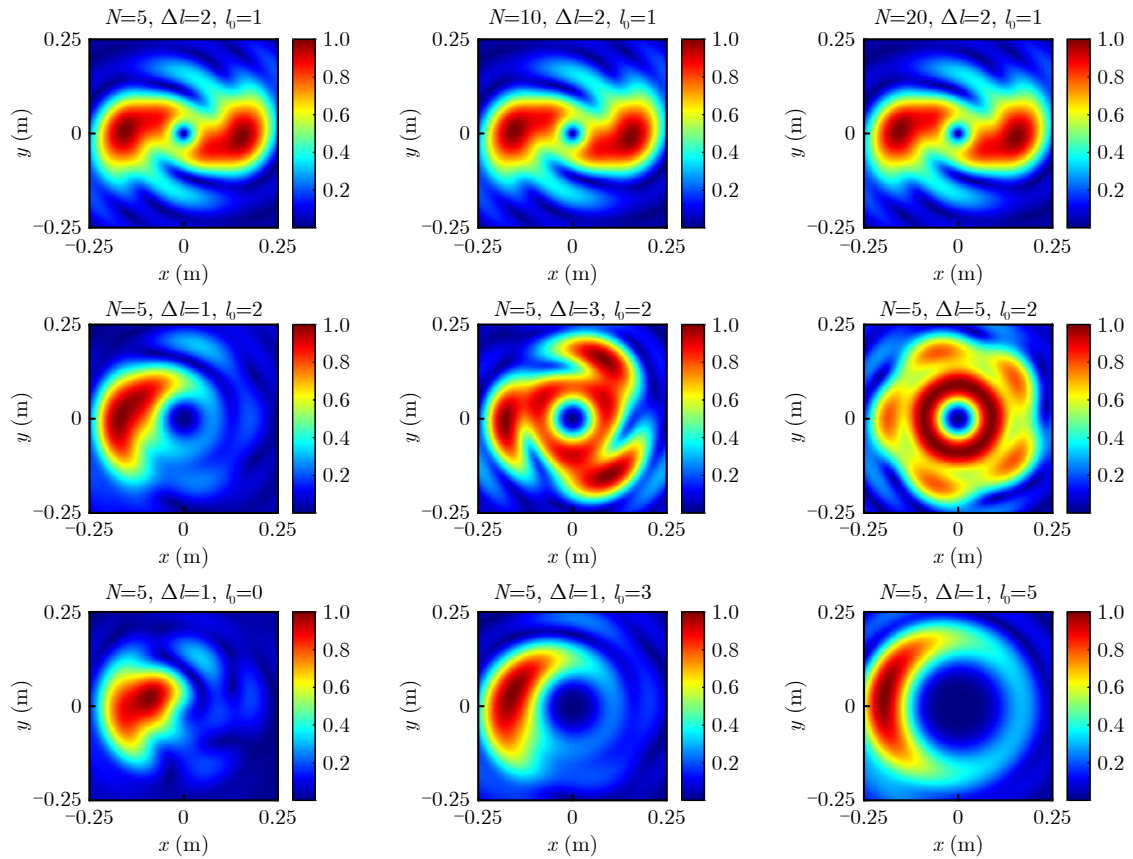


图6 不同模式组合散射场幅度分布图

Fig. 6 Amplitude distribution of scattering fields from different mode combinations

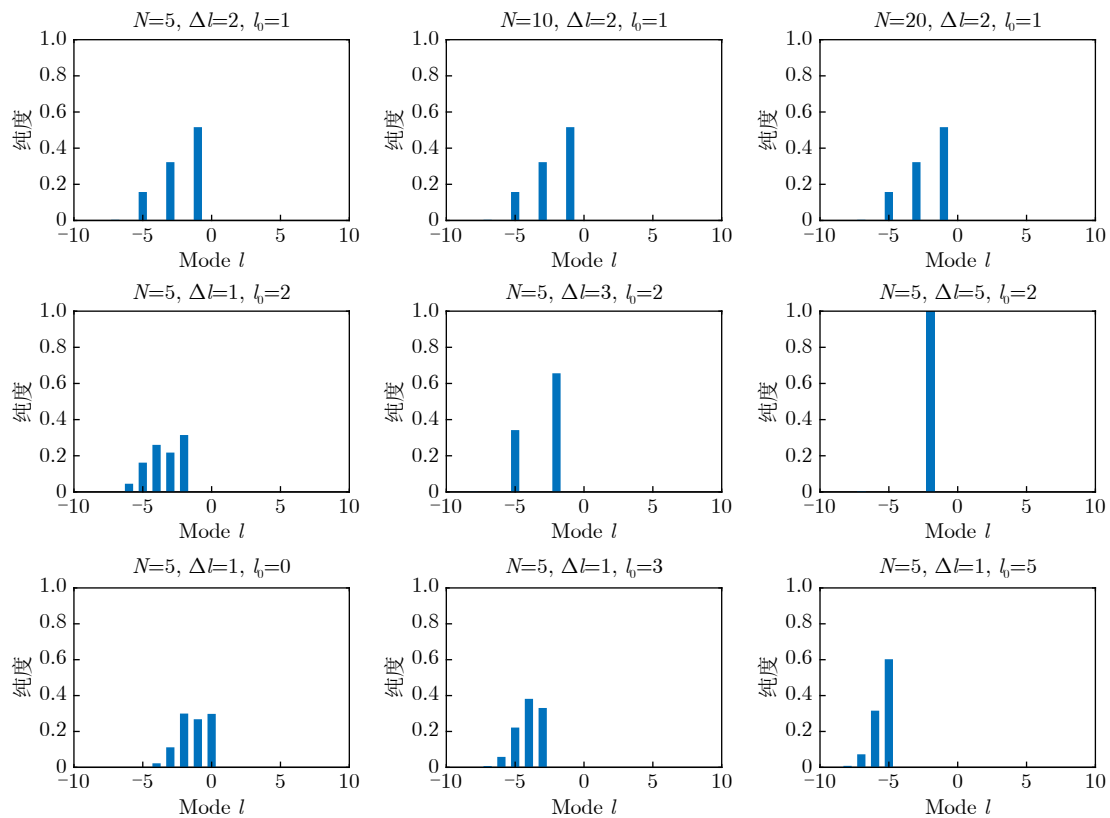


图7 不同模式组合散射场纯度谱

Fig. 7 Purity spectrum of the scattered field from different mode combinations

图8(a)展示了当 $l=0$ 时，目标在不同距离 R_{obs} 下的NORCS分布。使用了等大理想导体圆板作为目标计算RCS进行对比，其解析解为

$$\sigma(\theta) = \pi a^2 (ka)^2 \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right]^2 \cos^2 \theta \quad (11)$$

结果表明，在远场区域，图8(a)仿真曲线与平面波入射下的解析解高度吻合，验证了本文所采用的方法的有效性。然而，在 $z=1$ m的近场区，由于入射波前的球面曲率显著且幅度分布非均匀，目标表面的感应电流分布异于远场，从而使得NORCS曲线与解析解出现一定偏差。此外，当入射角 $\theta > 45^\circ$ 时，数值计算结果逐渐偏离解析解，这归因于PO算法近似基于切平面假设，忽略了目标边缘的绕射场及行波分量，这种截断效应在大角度入射时尤为显著，是产生计算偏差的主要原因。图8(b)进一步探究了单模态下涡旋波模态对散射特性的影响，涡旋波NORCS呈现中心零陷的特性，随着单模态 l_0 的增加($l_0 = 0, 1, 5, 20$)，NORCS主瓣出现显著衰减且波束宽度不断展宽。对于多模态情形，图8(c)表明在固定起始模态 $l_0=1$ ，模态数量 $N=3$ 与 $R_{\text{obs}}=$

5 m时，改变模态间隔 Δl 对NORCS包络的影响极其微弱，这源于涡旋波的发散角随模态数增大而增加，仅有低阶分量能被目标有效截获并激励感应电流。图8(d)显示在固定模态数量 $N=3$ ， $R_{\text{obs}}=5$ m与模态间隔 $\Delta l=1$ 时，随着起始模态 l_0 的增大，NORCS曲线整体呈下降趋势，这一规律与单模态分析一致，即构成多模态波束的基态模态数的增加加剧了波束的整体发散程度，最终导致NORCS减弱。

5 结语

本文通过建立多模态涡旋电磁波对理想导体目标的近场散射模型，系统揭示了其近场散射机理。研究表明，多模态涡旋波相干叠加形成的丰富幅相特征为目标识别提供了比传统平面波更多的物理自由度，但其能量截获效率随传播距离增加受目标孔径限制而显著下降，高阶模态分量呈现出类似低通滤波的衰减特性。针对实际探测中传播轴线不重合导致的模态谱串扰问题，本文提出利用空间位置互补性，通过对称位置散射场的矢量叠加实现了目标原始散射特征的有效重构。此外，目标几何形

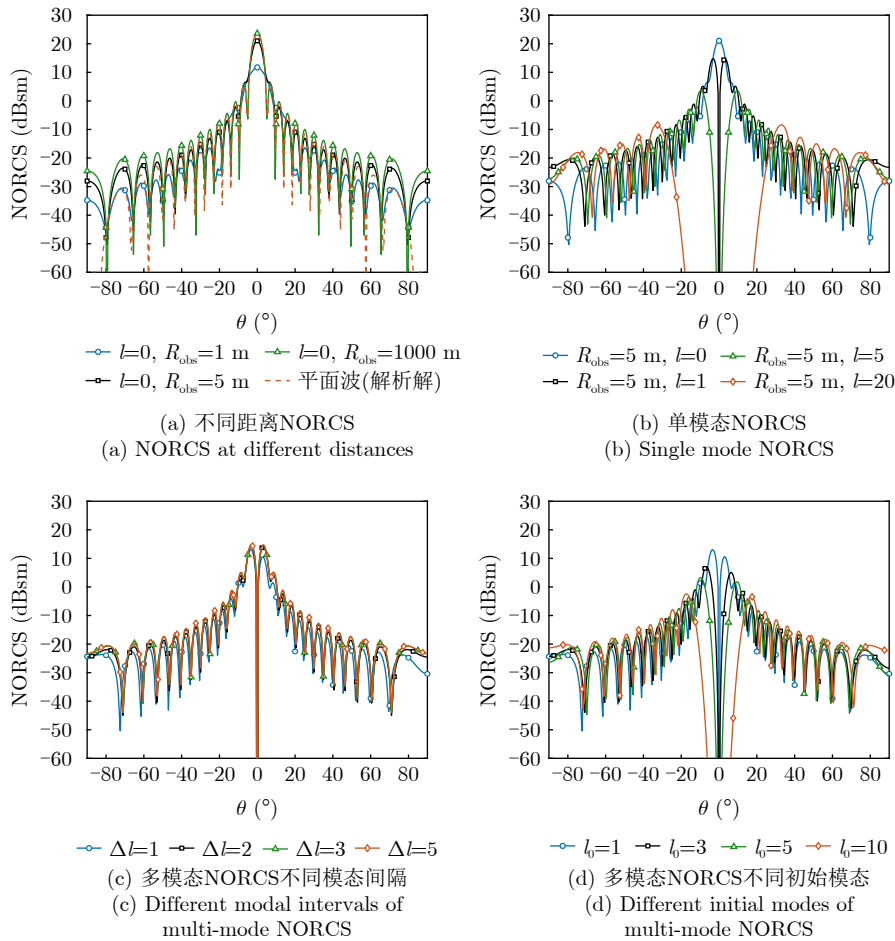


图 8 不同参数下的NORCS

Fig. 8 NORCS under different parameters

状在尺寸与主瓣相当时会对散射场产生一定的调制作用,这种效应随尺寸增大逐渐减弱。另外通过改变波束发散角决定了能量截获效率及NORCS的峰值强度,而模态间隔则在保持包络稳定的基础上诱导了散射场的径向分裂,这些发现共同为未来多模态涡旋雷达系统设计与成像识别提供了重要的理论支撑。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of Interests The authors declare that there is no conflict of interests

参 考 文 献

- [1] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J C, *et al.* Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185–8189. doi: [10.1103/PhysRevA.45.8185](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.45.8185).
- [2] LI Nan, ZHENG Shilie, YANG Hang, *et al.* A broadband dual-polarized reflective metasurface for THz OAM communication[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2024, 72(2): 1302–1311. doi: [10.1109/TMTT.2023.3300193](https://doi.org/10.1109/TMTT.2023.3300193).
- [3] YANG Hang, ZHENG Shilie, ZHANG Hongqi, *et al.* Metasurface-based high-speed photonic THz OAM communication system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(15): 5080–5087. doi: [10.1109/JLT.2024.3384477](https://doi.org/10.1109/JLT.2024.3384477).
- [4] ZHAO Yufei, MA Xiaoyan, GUAN Yongliang, *et al.* Near-orthogonal overlay communications in LoS channel enabled by novel OAM beams without central energy voids: An experimental study[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(24): 39697–39708. doi: [10.1109/JIOT.2024.3449975](https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3449975).
- [5] WANG Jianqiu, LIU Kang, WANG Yu, *et al.* A novel forward-looking target reconstruction method with electromagnetic vortex interferometry[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2023, 71(12): 5428–5444. doi: [10.1109/TMTT.2023.3278947](https://doi.org/10.1109/TMTT.2023.3278947).
- [6] TAN Zhengkuan, LIU Kang, LIU Hongyan, *et al.* Object location estimation method with radar transmitting vortex electromagnetic wave[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2025, 73(12): 10748–10756. doi: [10.1109/TAP.2025.3611297](https://doi.org/10.1109/TAP.2025.3611297).
- [7] LIU Kang, LIU Hongyan, LI Shuangxun, *et al.* Three-dimensional object imaging with vortex wave tomography[J]. *Optics Express*, 2025, 33(10): 20798–20806. doi: [10.1364/OE.563860](https://doi.org/10.1364/OE.563860).
- [8] LI Zhixiang, RUAN Yaping, CHEN Peng, *et al.* Liquid crystal devices for vector vortex beams manipulation and quantum information applications [Invited][J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(11): 112601. doi: [10.3788/COL202119.112601](https://doi.org/10.3788/COL202119.112601).
- [9] LIU Kang, GAO Yue, LI Xiang, *et al.* Target scattering characteristics for OAM-based radar[J]. *AIP Advances*, 2018, 8(2): 025002. doi: [10.1063/1.5018833](https://doi.org/10.1063/1.5018833).
- [10] ASIF M, ARFAN M, KHALEEL N, *et al.* Scattering from a perfect electromagnetic conductor (PEMC) sphere using Gaussian vortex beam[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2024, 56(9): 1474. doi: [10.1007/s11082-024-07379-3](https://doi.org/10.1007/s11082-024-07379-3).
- [11] ZHANG Xiaoxiao, SU Xiang, WU Zhensen, *et al.* Analysis of electromagnetic scattering from typical targets for orbital-angular-momentum waves: Theoretical model[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2022, 16(11): 699–708. doi: [10.1049/mia2.12284](https://doi.org/10.1049/mia2.12284).
- [12] LIU Kang, LIU Hongyan, SHA W E I, *et al.* Backward scattering of electrically large standard objects illuminated by OAM beams[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(7): 1167–1171. doi: [10.1109/LAWP.2020.2993687](https://doi.org/10.1109/LAWP.2020.2993687).
- [13] SUN Minghao, LIU Songhua, GUO Lixin, *et al.* Scattering characteristics of electrically large arbitrarily shaped targets illuminated by an off-axis vortex electromagnetic beam[J]. *Journal of Applied Physics*, 2023, 133(12): 124905. doi: [10.1063/5.0136564](https://doi.org/10.1063/5.0136564).
- [14] TANG Bo, BAO Jian, and SHENG Xinqing. Orbital-angular-momentum-carrying wave scattering by the chaff clouds[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12(6): 649–653. doi: [10.1049/iet-rsn.2017.0502](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2017.0502).
- [15] 王建秋, 刘康, 王煜, 等. 涡旋电磁波雷达成像分辨力研究[J]. *雷达学报*, 2021, 10(5): 680–690. doi: [10.12000/JR21054](https://doi.org/10.12000/JR21054).
WANG Jianqiu, LIU Kang, WANG Yu, *et al.* Resolution analysis of vortex electromagnetic radar imaging[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(5): 680–690. doi: [10.12000/JR21054](https://doi.org/10.12000/JR21054).
- [16] 陈鑫淼, 李海英, 吴涛, 等. 金属目标对贝塞尔涡旋波束的近场电磁散射特性[J]. *物理学报*, 2023, 72(10): 100302. doi: [10.7498/aps.72.20222192](https://doi.org/10.7498/aps.72.20222192).
CHEN Xinmiao, LI Haiying, WU Tao, *et al.* Near-field electromagnetic scattering of Bessel vortex beam by metal target[J]. *Acta Physica Sinica*, 2023, 72(10): 100302. doi: [10.7498/aps.72.20222192](https://doi.org/10.7498/aps.72.20222192).
- [17] ZHANG Xianmin, ZHENG Shilie, XIONG Xiaowen, *et al.* Structured beamforming based on orbital angular momentum mode-group[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(7): 1997–2006. doi: [10.1109/JLT.2022.3215211](https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3215211).
- [18] WANG Zhixia, ZHANG Shilie, XIONG Xiaowen, *et al.* Structure radio beam construction in azimuthal domain[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 9395–9402. doi: [10.1109/ACCESS.2020.2964833](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2964833).

- [19] YANG Lingjun, SUN Sheng, and SHA W E I. Manipulation of orbital angular momentum spectrum using shape-tailored metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(2): 2001711. doi: [10.1002/adom.202001711](https://doi.org/10.1002/adom.202001711).
- [20] WANG Yelong, QI Feng, LIU Yang, *et al.* Enhanced vortex phase imaging for millimeter-wave focal plane system[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2025, 73(10): 7289–7300. doi: [10.1109/TMTT.2025.3576938](https://doi.org/10.1109/TMTT.2025.3576938).
- [21] 林存坤, 张小宽, 吴盛源. 目标近场RCS对引战配合特性的影响研究[C]. 2015年全国微波毫米波会议论文集, 合肥, 2015: 356–359.
LIN Cunkun, ZHANG Xiaokuan, and WU Shengyuan. Research on influence of target near-field RCS on fuze warhead matching specific[C]. 2015 National Conference on Microwave and Millimeter Wave, Hefei, China, 2015: 356–359.
- [22] 张颖, 刘伟, 时卫莉, 等. 基于天线方向图与近场SBR的海面舰船复合散射研究[J]. *电波科学学报*, 2022, 37(1): 1–7. doi: [10.12265/j.cjors.2020170](https://doi.org/10.12265/j.cjors.2020170).
ZHANG Ying, LIU Wei, SHI Weili, *et al.* Composite scattering from sea and ship based on antenna pattern and near field SBR[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2022, 37(1): 1–7. doi: [10.12265/j.cjors.2020170](https://doi.org/10.12265/j.cjors.2020170).
- [23] ZHAO Yufei, GUAN Yongliang, CHEN Dong, *et al.* Exploring RCS diversity with novel OAM beams without energy void: An experimental study[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2025, 74(5): 8321–8326. doi: [10.1109/TVT.2024.3522296](https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3522296).
- [24] MALLIKHARJUNA REDDY Y and RATNA KUMARI U V. 3D printable PLA spiral phase plate with horn feed for OAM beam generation for 6G communication[J]. *International Journal of Information Technology*, 2024, 16(4): 2123–2128. doi: [10.1007/s41870-024-01764-7](https://doi.org/10.1007/s41870-024-01764-7).
- [25] ZHAO Wanglong, YU Shixing, and KOU Na. Stable divergence angle control of OAM vortex beams with different modes[J]. *Physics Letters A*, 2025, 541: 130428. doi: [10.1016/j.physleta.2025.130428](https://doi.org/10.1016/j.physleta.2025.130428).
- [26] WANG Cicheng, YANG Yuejie, WANG Yang, *et al.* Wideband dual-mode vortex wave metasurface based on distance inversion method[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(12): 9401–9410. doi: [10.1109/TAP.2024.3470229](https://doi.org/10.1109/TAP.2024.3470229).
- [27] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 9–62.
HUANG Peikang, YIN Hongcheng, and XU Xiaojian. Radar Target Characteristics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 9–62.
- [28] STRATTON J A and CHU L J. Diffraction theory of electromagnetic waves[J]. *Physical Review*, 1939, 56(1): 99–107. doi: [10.1103/PhysRev.56.99](https://doi.org/10.1103/PhysRev.56.99).
- [29] YAO E, FRANKE-ARNOLD S, COURTIAL J, *et al.* Fourier relationship between angular position and optical orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9071–9076. doi: [10.1364/OE.14.009071](https://doi.org/10.1364/OE.14.009071).
- [30] 孟祥帅. 基于人工电磁超表面涡旋电磁波产生及目标近场散射[D]. [博士论文], 西安电子科技大学, 2019: 145–175. doi: [10.27389/d.cnki.gxadu.2019.003154](https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2019.003154).
MENG Xiangshuai. Electromagnetic vortex wave generation and target near-field scattering based on artificial electromagnetic metasurface[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2019: 145–175. doi: [10.27389/d.cnki.gxadu.2019.003154](https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2019.003154).

作者简介

汪祠骋, 博士生, 主要研究方向为涡旋电磁波束的产生及应用。

赵宇飞, 研究员, 主要研究方向为结构化电磁波、无线通信技术、电磁场理论及应用。

杨河林, 教授, 主要研究方向为电磁波理论和应用、电磁超介质。

(责任编辑: 于青)