

采用回波相位加权的准涡旋电磁波雷达前视成像

舒高峰* 魏奕鑫 李 宁

(河南大学计算机与信息工程学院 开封 475004)

(河南大学河南省大数据分析处理重点实验室 开封 475004)

(河南大学河南省空间信息处理工程研究中心 开封 475004)

摘 要: 携带轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)的涡旋电磁波(Vortex ElectroMagnetic Wave, VEMW)由于不同OAM模式之间的正交性,在雷达前视成像方面表现出重要的应用潜力,引起国内外学者的广泛关注。在VEMW成像技术中,通常采用均匀圆环阵列(Uniform Circular Array, UCA)来生成和发射多模态VEMW照射成像目标,以获得回波。然而,UCA产生的VEMW有主瓣发散的特点,导致在自由空间中产生的电磁波能量分布不集中,从而使得雷达回波能量相对较弱。此外,传统涡旋电磁波雷达在工作过程中需要不断切换OAM模式,这一过程增加了系统的复杂性。为了应对上述挑战,该文首先建立了准圆环阵列(Quasi-Circular Array, QCA)的电场模型,通过QCA得到了能量更加集中的准涡旋电磁波。同时,提出了一种对每个阵元的接收回波进行多OAM模式相位加权的方法,得到等效多模式接收回波。仿真结果表明,相比于基于UCA的涡旋电磁波雷达成像方法,该文所提方法方位分辨率提高了两倍以上,并且有效地提高了回波能量,在信噪比低至-15 dB的环境下,重建的目标仍然清晰可见。该文所提方法在雷达前视成像领域具有较大的实际应用潜力。

关键词: 涡旋电磁波; 雷达前视成像; 准圆环阵列; 回波相位加权

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2025)11-4373-11

DOI: 10.11999/JEIT250542

CSTR: 32379.14.JEIT250542

1 引言

雷达成像作为一种全天时、全天候和远距离的信息获取手段,已成为国家之间竞相发展的关键技术。前视雷达成像作为雷达成像的一种,在敌情探测、飞机盲降、导弹制导和复杂地形探测等应用中发挥着不可替代的作用^[1,2]。一般情况下,雷达成像分辨率主要体现在距离向和方位向两个维度,距离向通过发射大带宽线性调频信号,利用脉冲压缩技术完成压缩,以实现距离向高分辨率。对于方位向分辨率,现有的合成孔径和多普勒波束锐化等依赖多普勒信息的成像技术受限于成像机理,均在前视区域存在视野盲区^[3-6]。实孔径雷达利用实波束扫描成像区域,积累各个方位回波,但是受波束分辨瑞利限制的制约,方位向分辨率较低,已经不能满足人们对于雷达前视分辨率日益提升的性能需求,因此需要探索新的雷达前视成像体制解决这一问题。

携带有轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)的电磁波称为涡旋电磁波^[7,8],其表达式中一般包含相位项 $e^{i\ell\varphi}$ ^[9-12]。研究发现涡旋电磁波的模

式数 ℓ 具有无穷性,且不同模式的涡旋电磁波相互正交^[7],因此携带轨道角动量的涡旋电磁波为信息调制提供了一个新的维度^[8]。涡旋电磁波雷达成像是一种新型成像体制,在涡旋电磁波照射下,目标不同方位角经历了不同的相位,使得回波中具有更加丰富的信息。目标的方位角与OAM模式数之间形成了傅里叶变换意义下的对偶变量,这使得涡旋电磁波雷达能够不依赖于雷达与目标之间的相对运动、波束扫描等传统方式,形成新的方位相位项,提供方位向分辨能力,在前视雷达成像领域具有较大的应用潜力^[12-14]。

不同模态涡旋电磁波之间的正交特性允许在有限的OAM模式数下进行雷达成像^[15-17]。现有的VEMW成像系统大多是基于均匀圆环阵列(Uniform Circular Array, UCA)进行的^[18,19]。然而,UCA的对称性分布导致各阵元在波束中心产生的电场能量相互抵消,造成主瓣发散、能量不聚焦和旁瓣高等问题^[20]。这些问题导致波束中心方向部分模态的信息损失,进而导致分辨率下降,并且在低信噪比环境下,成像效果不佳。

针对低信噪比下成像效果不佳问题,研究人员提出了基于阵列优化设计与波形编码等方法。例如,Liu等人^[21]提出了一种利用分数阶OAM模态的成像方法,采用有限个整数OAM模态的涡旋电磁波合成分数阶模态,提高了回波的信噪比,这一种

收稿日期: 2025-06-04; 改回日期: 2025-09-17; 网络出版: 2025-09-23

*通信作者: 舒高峰 gaofeng.shu@henu.edu.cn

基金项目: 河南省自然科学基金(242300421170)

Foundation Item: The Natural Science Foundation of Henan (242300421170)

方法在信噪比为-5 dB的情况下展示了良好的成像性能。2024年, Kuang等人^[22]基于傅里叶合成提出了一种阵元幅度调制的波前调制技术, 设计了波前相位随方位角线性变化且能量收敛的辐射场, 利用该技术产生的涡旋电磁波主瓣较为集中。Mao等人^[23]在2023年提出了一种正交相位编码方法, 有效地抑制了涡旋电磁波能量发散的问题, 可以在信噪比为-5 dB的环境中成像。然而, 上述方法均在不同程度上降低了涡旋电磁波的纯度, 在低于-5 dB信噪比的环境下成像结果不佳。

针对涡旋电磁波主瓣能量发散和低信噪比下成像效果不佳的问题, 本文受准圆环阵列^[24](Quasi Circular Array, QCA)的启发, 首次将QCA引入雷达前视成像领域, 并且针对在发射端调制多模态涡旋电磁波脉冲重复频率高的问题, 提出了一种结合相位加权的回波后处理方法。所提方法利用QCA产生主瓣集中的准涡旋电磁波照射成像目标, 采用接收回波相位加权的方法得到等效多模态回波并进行成像处理, 有效地解决了涡旋电磁波主瓣能量发散与低信噪比下成像效果不佳这一挑战, 并且通过相位处理得到等效多模态回波这一方法大大降低了系统复杂性, 提高了回波获取速度, 仿真结果验证了该方法的有效性。

2 基于QCA产生的准涡旋电磁波

2.1 电场模型

基于QCA产生携带不同OAM模态的准涡旋电磁波, 如图1所示, M 个阵元均匀地排列在半径为 a 的部分圆周上。为了产生OAM模态为 l 的准涡旋电磁波, 为每个阵元施加等幅度的激励 E_0 , 与递增的相位激励 $\varphi_m = 2\pi l(m-1)/N$, $m = 1, 2, \dots, M$, 其中 N 为全孔径UCA阵元的个数。假设部分圆环阵列上的阵元为电偶极子, 则对于空间中的任意一点 $P(r, \theta, \varphi)$, 该处的场强可写为

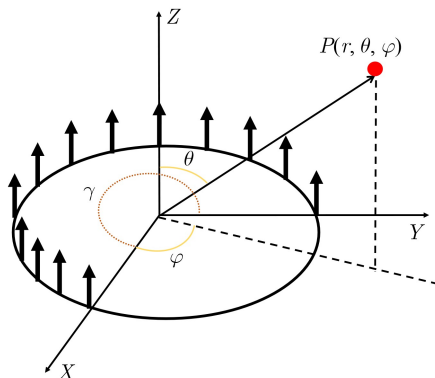


图1 QCA几何模型

$$E = -\frac{J\mu_0\omega}{4\pi} \sum_{m=1}^M E_0 \frac{e^{ik|r-r_m|}}{|r-r_m|} e^{il\varphi_m} \quad (1)$$

其中 J 为偶极子天线的电流密度, μ_0 为真空磁导率常数, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长, r 表示阵元与目标之间的距离, $i = \sqrt{-1}$ 为虚数单位。

利用无穷小偶极子近似, 当 M 趋近于无穷大时, 式(1)可以写为积分形式

$$E = -E_0 \frac{J\mu_0\omega}{4\pi} \frac{e^{ikr}}{r} \int_0^\gamma e^{ika \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_m)} e^{il\varphi_m} d\varphi_m \quad (2)$$

其中 $\gamma = M\beta$ 表示阵元分布的圆弧, θ 表示俯仰角, φ 表示方位角。

后续为了方便表示, 用 C 表示 $-E_0 \frac{J\mu_0\omega}{4\pi} \frac{e^{ikr}}{r}$ 。利用雅可比-安格尔展开计算式(2)

$$\begin{aligned} E &= C \int_0^\gamma e^{il\varphi_m} \left(\sum_{\nu=-\infty}^{+\infty} i^\nu J_\nu(ka \sin \theta) e^{i\nu(\varphi - \varphi_m)} \right) d\varphi_m \\ &= C \sum_{\nu=-\infty}^{+\infty} i^\nu J_\nu(ka \sin \theta) \int_0^\gamma e^{i(l-\nu)\varphi_m} d\varphi_m \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $J_l(x)$ 表示自变量为 x , 阶数为 l 的第1类贝塞尔函数; ν 表示其他谐波的阶数。

式(3)的积分项有两种情况

$$\int_0^\gamma e^{i(l-\nu)\varphi_m} d\varphi_m = \begin{cases} \gamma, & \nu = l \\ \frac{e^{i(l-\nu)\gamma} - 1}{i(l-\nu)}, & \nu \neq l \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3), QCA在远场任意一点的电场可以表示为

$$E = C\gamma^l J_l(ka \sin \theta) e^{il\varphi} + \sum_{\nu \neq l} C i^\nu J_\nu(ka \sin \theta) \cdot \frac{e^{i(l-\nu)\gamma} - 1}{i(l-\nu)} e^{i\nu\varphi} \quad (5)$$

从式(5)中可以观察到由QCA在远场产生的准涡旋电磁波可以看作基波与谐波相互叠加的结果。

图2显示了由QCA产生不同模态准涡旋电磁波的模式谱图。从图2中可以看出, 使用QCA产生的准涡旋电磁波, 其谐波的强度要比主模态的强度低得多, 这一现象表明, 采用QCA产生的准涡旋电磁波, 能够产生预期得到的准涡旋电磁波模态。因此, 为了方便起见, 可以将式(5)写为

$$E = A(l, \theta) i^l e^{il\varphi} \quad (6)$$

其中 $A(l, \theta)$ 可以看作对全孔径UCA产生涡旋电磁波的相位与幅度重加权, 根据这个意义, QCA产生的准涡旋电磁波可以写为

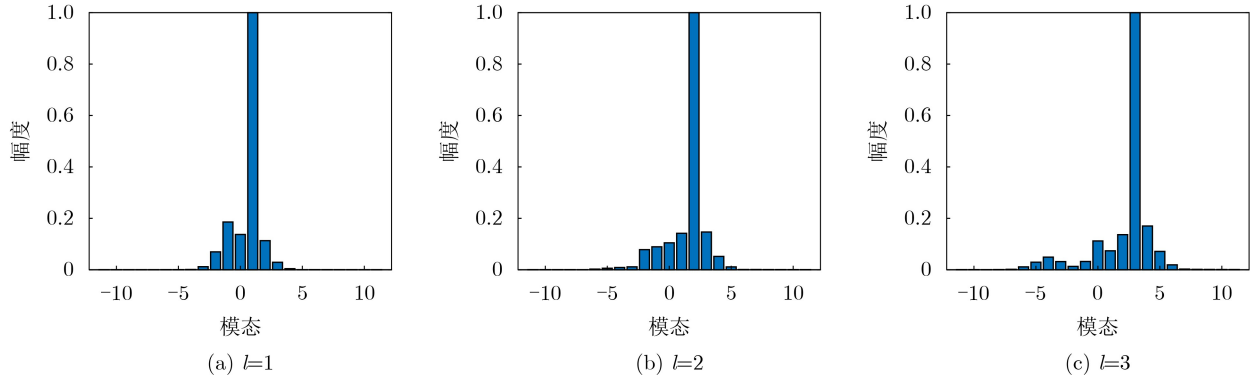


图2 半径 $a = 2\lambda$ ，阵元激励 $E_0 = 1$ ，阵元数 $M = 13$ 的QCA产生涡旋电磁波的模式谱图

$$A(l, \theta) = C\gamma^l J_l(ka \sin \theta) \cdot V(l, \theta) \quad (7)$$

$V(l, \theta)$ 表示准圆环阵列相对于全孔径UCA的辐射特性修正因子，用于描述QCA因阵列分布范围限制，对主模态涡旋电磁波幅度与相位的加权作用。联合式(5)和式(6)，可以得到

$$V(l, \theta) = \sum_{\nu \neq l} \frac{J_\nu(ka \sin \theta)}{J_l(ka \sin \theta)} e^{i(\nu-l)\varphi} \cdot \sum_{\nu \neq l} \frac{i^{\nu-l}}{\gamma^l} \frac{e^{i(l-\nu)\varphi} - 1}{i(l-\nu)} + 1 \quad (8)$$

式(8)中第1个求和项的绝对值，可以看作产生准涡旋电磁波的纯度^[25]。

2.2 主瓣集中的准涡旋电磁波

根据惠更斯原理，每个沿圆弧放置的辐射源都能够产生次级波，这些次级波能够产生相干和相消干涉。QCA通过对阵元的方位分布施加约束，破坏了UCA阵元分布的对称性，减少了相消干涉，因此能够产生能量更加集中的涡旋电磁波，这一特性能够提升雷达在低信噪比环境下接收到的回波强度，从而提升雷达在低信噪比下的成像性能。

对于准涡旋电磁波的特性分析，特别是幅度与相位分布，有益于将其应用于成像技术研究中的信号与算法设计。图3(a)–图3(f)对比了采用阵元数 $M = 13$ ，电尺寸半径 $\bar{a} = 2\lambda$ 的部分孔径QCA与 $N = 16$ 的全孔径UCA产生不同模态涡旋电磁波在 $z = 100\lambda$ 处，窗口大小为 $100\lambda \times 100\lambda$ 的天线方向图。通过对比可以看到，由于QCA阵元不对称性导致的相消干涉的减少，所产生的涡旋电磁波主瓣更加集中并且辐射增益更高。从图3(g)–图3(i)可以看到由QCA产生涡旋电磁波主瓣相位仍然保持很高的线性程度。

假设由QCA产生两个模态的涡旋电磁波 E_{l1} 和 E_{l2} ，对这两个涡旋电磁波在 $\varphi \in [0, 2\pi]$ 范围内进行积分可以得到

$$\int_0^{2\pi} E_{l1} E_{l2} d\varphi = \begin{cases} 0, & l_1 \neq l_2 \\ E_{l1} E_{l2}^*, & l_1 = l_2 \end{cases} \quad (9)$$

式(9)表明，与在数学函数空间中的正交性条件类似，由部分孔径QCA产生的不同模态的准涡旋电磁波本征态之间相互正交，可以张成一个无穷维的希尔伯特空间。准涡旋电磁波与目标方位间的对偶关系为方位向提供了分辨能力。

图4展示了在相同阵列配置下UCA与QCA产生模态 $l = 1, 2, \dots, 6$ 的涡旋电磁波主瓣的增益。从图中可以看出，QCA所产生准涡旋电磁波的主瓣增益明显高于UCA所产生涡旋电磁波的主瓣增益。QCA的这一特性能够使其应用在雷达成像领域时，提高雷达的抗噪性能。此外，这一结论也表明，在设计阵列时，有望在降低硬件复杂度与成本的同时，拥有相同的成像性能。

3 基于准圆环阵列的相位加权回波模型与成像方法

在本节中，首先利用2.3节中QCA产生的电场结果，推导了基于QCA的相位加权的等效多模态回波表达式。同时，还分析了相位加权技术对回波的影响。最后，利用成像算法推导了方位向的点扩散函数。

3.1 相位加权回波模型

图1中， $P(r, \theta, \varphi)$ 表示自由空间中一个理想的点目标。当QCA以 l_T 模态发射， l_R 模态接收时，第 m 个阵元接收到的回波可以写为

$$S_m(l, t) = A_0 \cdot \left[C^2 \left(\frac{e^{ik|r-r_m|}}{|r-r_m|} \right) e^{il_T \varphi_m} \right] w_r(t) + n \quad (10)$$

其中， A_0 表示点目标的后向散射系数； n 表示均值为0，方差为 σ^2 的高斯白噪声； $w_r(t)$ 表示发射线性调频信号得到的距离向包络。

为了获得等效多模态回波，首先，将QCA中 M 个阵元接收到的单模态回波存储下来。然后，对每个阵元接收到的回波施加不同涡旋模态的相位权重，以调制出不同模态的信号。 l_T 模态发射， l_R 模态调制后的等效模态回波可以表示为

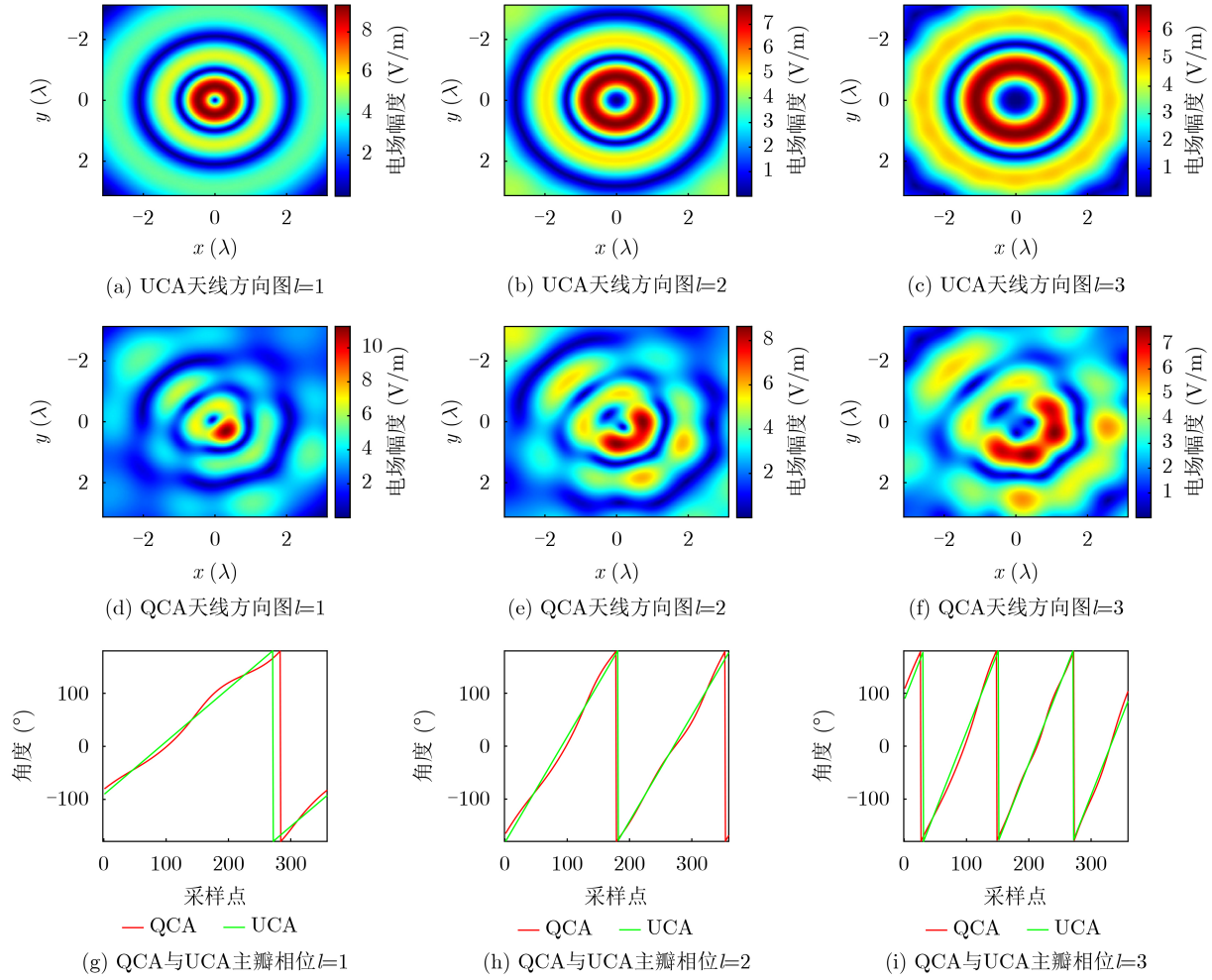


图3 相同阵列配置下QCA与UCA产生的不同模态的天线方向图的电场幅度与相位对比

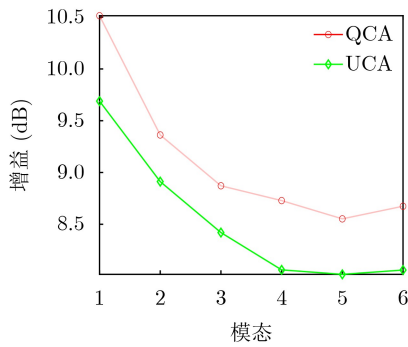


图4 QCA与UCA产生不同涡旋电磁波的主瓣增益

$$S_r(l, t) = A_0 C^2 \left[\sum_{m=1}^M \left(\frac{e^{ik|r-r_m|}}{|r-r_m|} \right)^2 e^{i(l_T+l_R)\varphi_m} \right] \cdot w_r(t) + n \quad (11)$$

重复上述步骤, 可实现等效单模态发射-多模态接收的回波信号。

图5(a)是等效单模态发射-多模态接收回波成像处理流程图, 图5(b)为所提方法在进行成像处理之前进行的回波相位加权示意图。为了获得等效多模

态回波, 需要对 M 个接收阵元施加一个新的相位 $l_R \varphi_m$ 。因此, 调制的信号可以表示为

$$G(l, M) = \sum_{m=1}^M \frac{e^{ik|r-r_m|}}{|r-r_m|} e^{il\varphi_m} \quad (12)$$

$$S_r(l, t) = A_0 C^2 \cdot [G(l_T, M) \cdot G(l_R, M)] w_r(t) + n$$

根据QCA产生准涡旋电磁波的电场结果, 等效单模态发射-多模态接收的回波式(15)可以表示为

$$S_r(l, t) = A_0 C^2 \left[A(l_T, \theta) A(l_R, \theta) i^{l_T+l_R} e^{i(l_T+l_R)\varphi} \right] \cdot w_r(t) + n \quad (13)$$

3.2 相位调制影响分析

对QCA接收到的单一模态回波进行相位调制得到的结果如式(13)所示, 为了分析相位加权回波后处理的影响, 图6展示了当发射模态 $l_T = 1$ 时, 对其进行相位调制的结果。

对比图6与图3可以明显地看出, 经过相位调制后的合成天线辐射方向图具有更加集中的主瓣, 并且主瓣幅度得到了大幅提升。此外, 从图中可以看

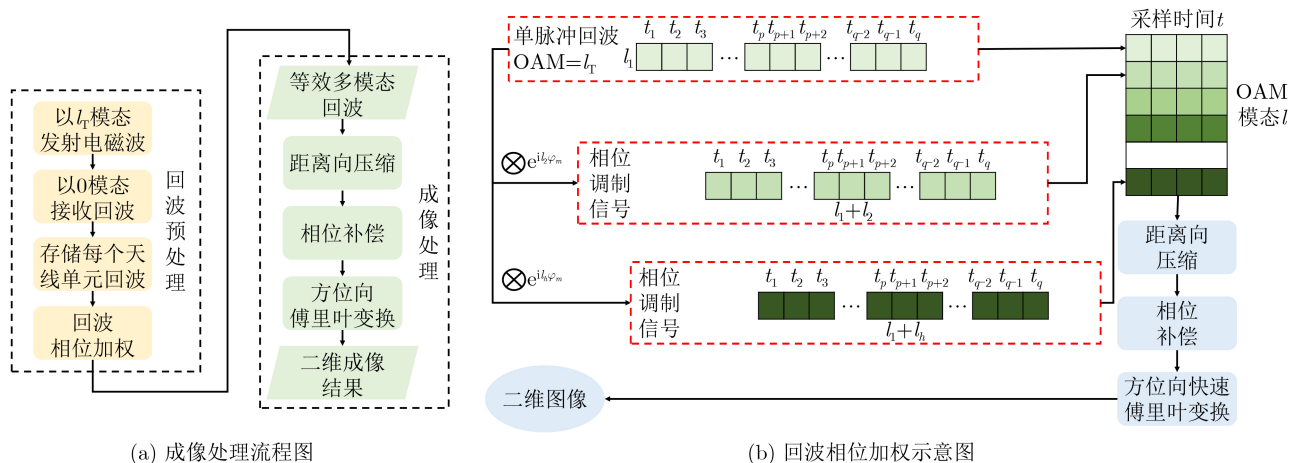


图5 等效单模态发射-多模态接收回波成像处理流程图

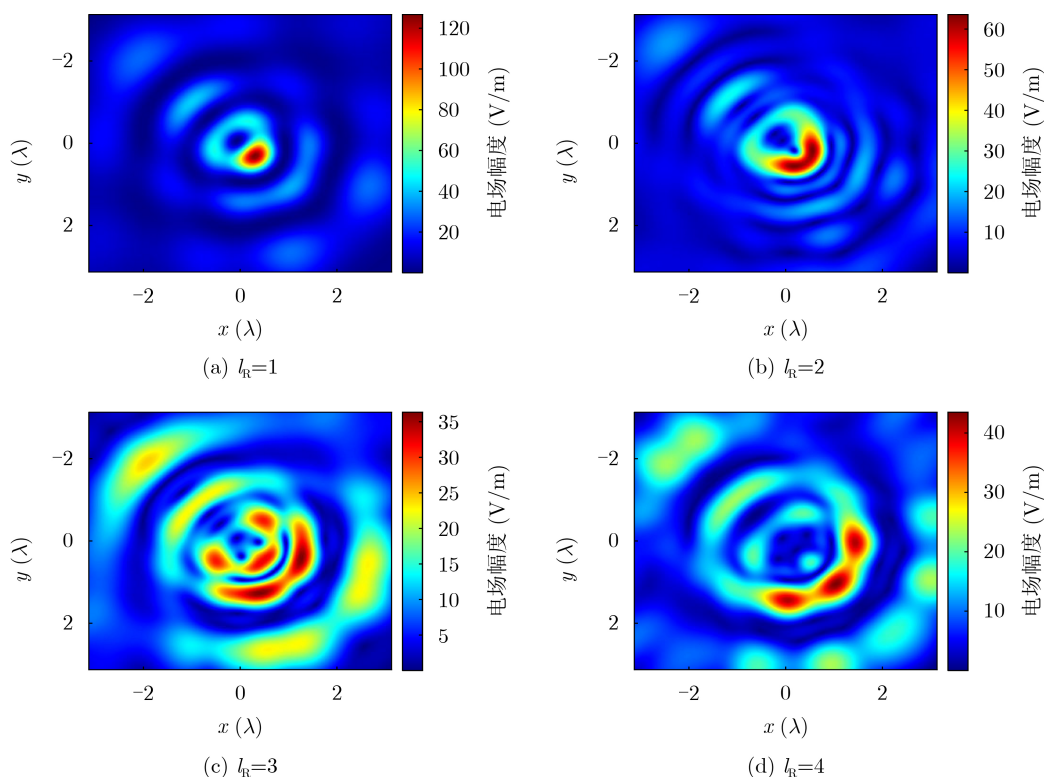


图6 相位调制对辐射方向图的影响

到经过相位调制后主瓣宽度也有一定的下降, 根据瑞利分辨率定义, 目标经过QCA照射得到的回波进行相位调制并成像后, 分辨率也会得到一定的提升。

图7为相同阵列配置下, 分别利用UCA与本文所提方法得到的主瓣能量结果, 经过计算可以得到, 相位调制后天线辐射方向图的主瓣能量相比于UCA提高了1.292 dB, 即与UCA相比, 本文所提的方法在能耗降低25.73%的情况下, 仍然能够达到与UCA相同的性能。所提方法的这一特性能够有效提高雷达系统的抗噪性能。

图8显示了相同阵列配置下, 分别利用UCA与

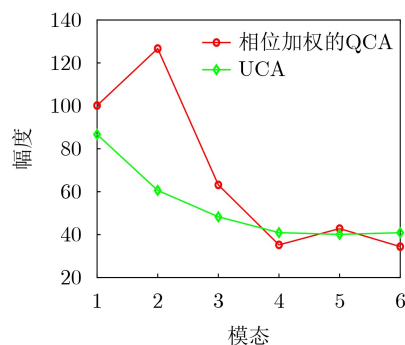


图7 UCA与本文所提方法得到天线方向图的主瓣能量

所提方法得到的主瓣内相位。从图中可以看出, 合成的天线方向图主瓣内相位变化与UCA几乎一

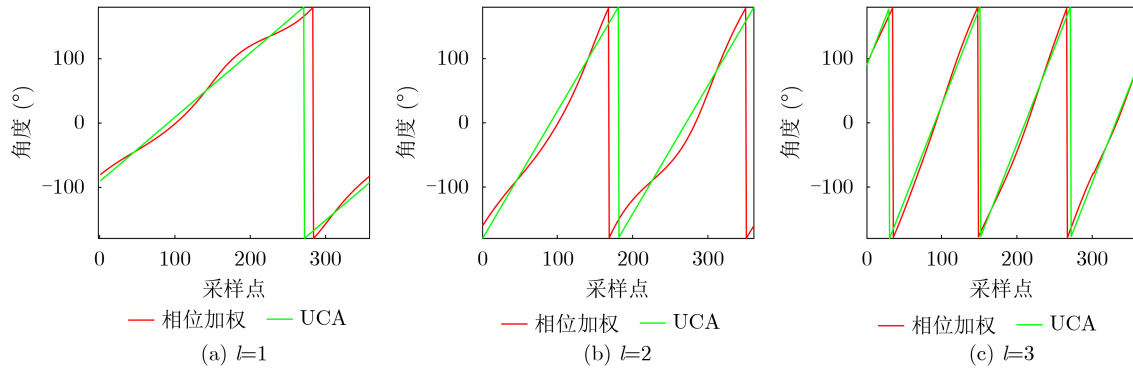


图8 主瓣相位

致, 相位仍然随方位角近似线性变化。对图8的相位进行线性拟合, 得到的主瓣相位线性度如表1所示, 表1数据表明, 通过QCA接收到回波并利用相位调制进行处理后, 对得到的回波方位向相位影响很小。

3.3 成像方法

由于发射的信号为线性调频信号, 因此在距离向上, 距离信息可以通过对回波进行下变频与脉冲压缩得到

$$S_{rc} = A_0 C^2 \left[A(l_T, \theta) A(l_R, \theta) i^{l_T+l_R} e^{i(l_T+l_R)\varphi} \right] \cdot \text{sinc} \left[B_w \left(t - \frac{2r}{c} \right) \right] e^{-i4\pi \frac{r}{\lambda}} \quad (14)$$

其中, B_w 是发射信号的带宽。

由上文可知, 经过相位调制后得到的等效多模态完整回波信号的方位向相位仍然存在方位角与模态之间为傅里叶对偶的关系。换句话说, 方位向信息可以通过傅里叶变换得到。因此, 方位向的点扩散函数可以表示为

$$\begin{aligned} \text{PSF}_Q &= \mathcal{F} \left(A_0 C^2 \left[A(l_T, \theta) A(l_R, \theta) i^{l_T+l_R} e^{i(l_T+l_R)\varphi} \right] + n \right) \\ &= A_0 C^2 \cdot \mathcal{F} \left(A(l_T, \theta) A(l_R, \theta) i^{l_T+l_R} \right) \\ &\quad \cdot \text{sinc}(\psi - \varphi) + n \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $\mathcal{F}(\cdot)$ 表示傅里叶变换, ψ 表示方位空间。

通过对UCA产生不同模态涡旋电磁波照射目标得到的方位回波进行傅里叶变换可以得到其方位向点扩散函数为

$$\begin{aligned} \text{PSF}_U &= \mathcal{F} \left(A_0 C^2 J_l(ka \sin \theta) i^l e^{il\varphi} + n \right) \\ &= A_0 C^2 \cdot \mathcal{F} \left(J_l(ka \sin \theta) i^l \right) \text{sinc}(\psi - \varphi) + n \end{aligned} \quad (16)$$

表1 本文方法主瓣相位线性度(%)

相位调制模态(t_s)	主瓣相位线性度
1	98.85
2	98.22
3	99.93

通过分析式(15)、式(16)可以看出, 本文所提方法得到的方位向回波可以看作两个不同模态天线方向图相互作用的结果, 由于合成天线方向图的主瓣增益更高, 并且更加集中, 因此回波幅度相比UCA来说会更强, 分辨率也能得到一定的提高。根据Parseval定理, 高斯白噪声在经过傅里叶变换之后会较为平坦, 因此本文所提方法能够提升回波信噪比, 在低信噪比环境下得到最佳的成像效果。

根据傅里叶变换的性质可知, 由于相位 $i^{l_T+l_R}$ 的存在, 在模态域对回波进行傅里叶变换时, 式(14)对应的频谱为关于原点对称的双峰, 这将严重影响成像性能。为了解决这个问题, 必须对回波进行相位补偿。根据上文的分析, 由于QCA在远场产生的涡旋电磁波可以看作主模态占据主导地位, 谐波强度都非常低, 因此, 相位补偿仅需针对主模态进行, 补偿函数 $h(l_T + l_R)$ 可以写为

$$h(l_T + l_R) = \begin{cases} -(-i)^{l_T+l_R}, J_{l_T}(ka \sin \theta) J_{l_R}(ka \sin \theta) < 0 \\ (-i)^{l_T+l_R}, J_{l_T}(ka \sin \theta) J_{l_R}(ka \sin \theta) > 0 \end{cases} \quad (17)$$

经过相位补偿后的回波可以写为

$$\begin{aligned} S_c &= S_{rc} \cdot h(l_T + l_R) \\ &= A_0 C^2 \left[A(l_T, \theta) A(l_R, \theta) e^{i(l_T+l_R)\varphi} \right] w_r(t) \end{aligned} \quad (18)$$

4 实验与结果分析

为了验证所提方法的方位分辨率提升, 实验设置不同的模态范围, 对点目标完成成像后计算方位向切面的-3 dB宽度进行评估; 为了验证所提方法的抗噪性能, 对比了在不同信噪比环境下的传统基于UCA的涡旋电磁波成像结果与所提方法的成像结果的差异。

雷达的系统参数如表2所示。对于理想点目标 $P(180m, \pi/6, 0)$, 图9对比了不同模态范围下, 点目标方位向成像效果。从图9(a)–图9(c)可以看出, 本

文所提方法聚焦后在方位向上不对称,这是由于QCA阵元空间分布的不对称性造成的。

在相同的系统参数下,仿真得到了UCA的方位向成像结果。通过对比图9(a)–图9(c)与图9(d)–图9(f)与表3的数据可以看到,所提方法得到的方位向聚焦效果,拥有更高的分辨率与更低的旁瓣,具有更好的成像性能。这一结果验证了前文的推导。

在实际应用中,接收到的雷达回波并不仅仅包含散射点的信息,同时还存在大量的噪声。为了评估所提方法的抗噪性能,对回波中加入不同能量的

高斯白噪声后进行成像处理。目标的理想模型如图10所示,图11展示了不同信噪比环境下的成像结果。其中UCCA采用6个不同半径的UCA组成同心圆环,其中第1层的UCA为16个阵元。

图11(g)–图11(i)为基于UCA方法在加入噪声后的聚焦结果,可以看到,在低噪声环境下,基于UCA的方法得到的结果已无法分辨。所提方法由于具有更高的辐射增益,因此,可以在更低的信噪比环境中得到较好的成像结果。如图11(a)–图11(c)所示,当信噪比为−10 dB时,所提方法能够得到清晰的成像结果,当信噪比降至−15 dB时,虽然重建目标的一部分被噪声淹没,但是目标的形状仍然可以清晰地辨认,当信噪比达到−20 dB时,目标已完全被噪声淹没,无法分辨出目标,已达到所提方法的上限,此时需要进一步对回波进一步处理,以降低噪声对回波的影响,这一实验验证了本文所提方法在低信噪比环境下能够得到更优的成像结果。观察图11(d)–图11(f)可以看到,基于UCCA^[26]的成像结果与所提

表 2 雷达系统参数

	符号	值
载频	f_e	9.6 GHz
带宽	$B_{\pm 0}$	50 MHz
阵元个数	M	13
电尺寸半径	$\bar{a}$	2
发射的OAM模式	t_r	1

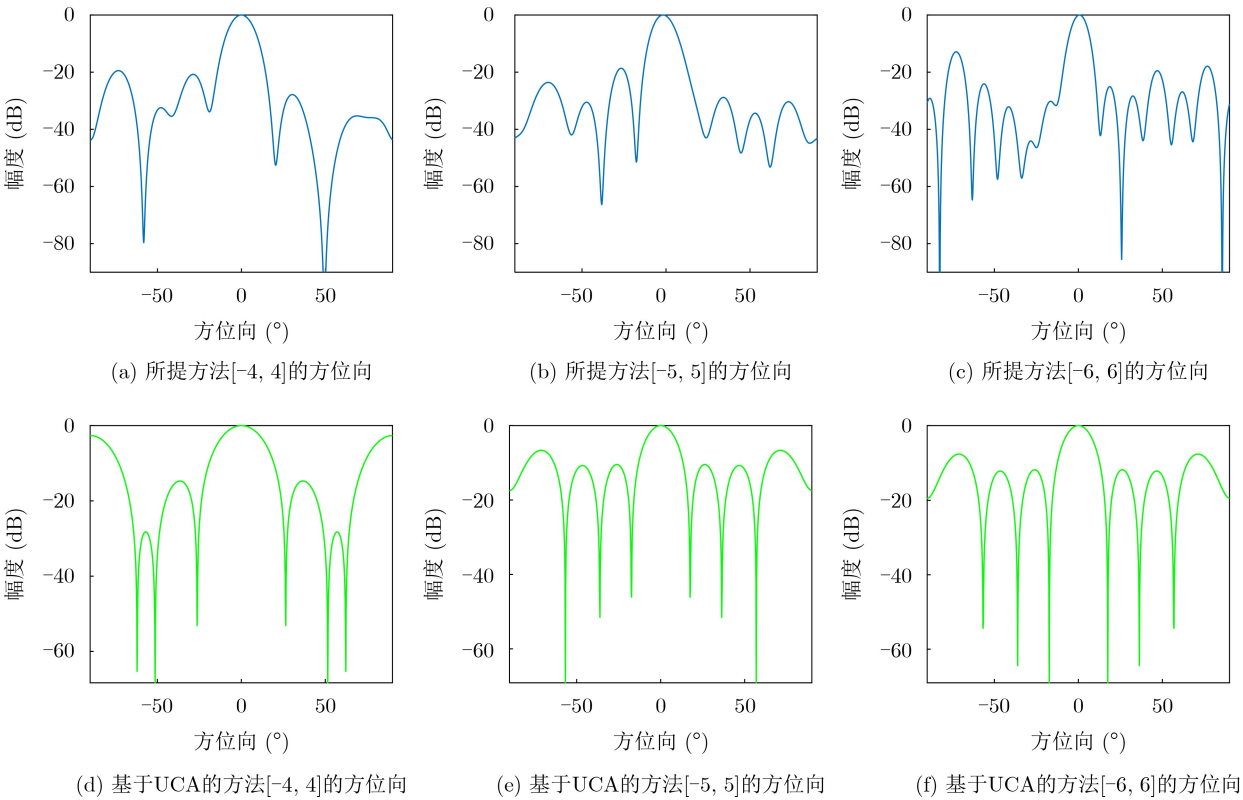


图 9 本文方法与传统方法在不同模式范围下的点目标成像结果和方位向切面

表 3 不同模式下的方位向评估指标

方法	方位向分辨率 (°)			峰值旁瓣比 (dB)		
	[-4,4]	[-5,5]	[-6,6]	[-4,4]	[-5,5]	[-6,6]
所提方法	12.4	9.3	4.8	−21	−20	−30
基于UCA的方法	23.9	18.1	16	−15	−11	−11

方法的效果差别很小,这是因为UCCA阵列可以通过切换不同的圆环,以改变模态的指向,增强回波能量,因此可以在低信噪比下拥有较好的效果,但是采用UCCA阵列需要更多的阵元个数,增大了系统设计的复杂性与硬件负担,因此所提方法与基于UCCA的方法相比仍然具有较大的优势。

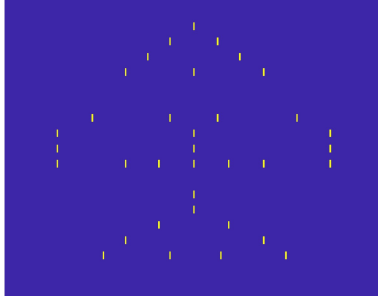


图 10 目标理想模型

此外,为了定量评估在低信噪比环境中重建图像的质量,本文引入了均方误差与图像熵对其进行评估,均方误差与图像熵的公式可以分别表示为

$$\text{MSE} = \frac{\|\hat{\mathbf{s}} - \mathbf{s}\|_2^2}{\|\mathbf{s}\|_2^2} \quad (19)$$

其中, $\|\cdot\|_2$ 表示 L_2 范数, $\mathbf{s}$ 表示真实目标, $\hat{\mathbf{s}}$ 表示重建后的目标。

$$\text{Entropy} = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{I[n, m]}{G} \log \left(\frac{I[n, m]}{G} \right) \quad (20)$$

其中, $G = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I[n, m]$, $I[n, m]$ 代表成像结果图中坐标为 (n, m) 像素点的像素值。

通过蒙特卡罗多次模拟仿真结果计算得到,所提方法的均方误差比UCA低2.987倍,图像熵比基于UCA的方法降低1.1844倍,与基于UCCA重建后

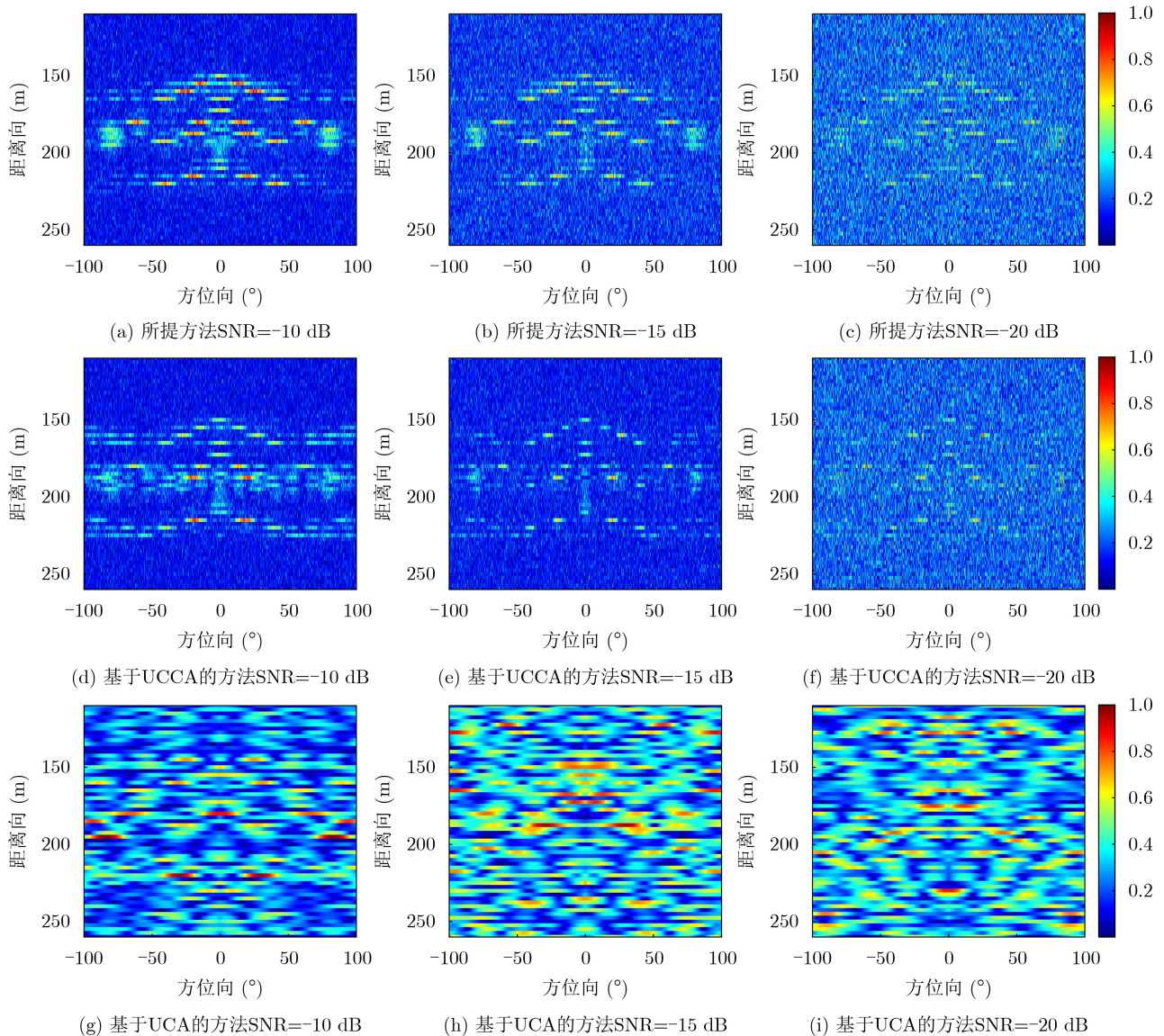


图 11 本文方法与对比方法在不同信噪比下的成像结果

结果相比, 均方误差和图像熵基本一致, 这是由于采用UCCA阵列可以利用不同半径的圆环发射不同的模态, 使不同模态的主瓣对准目标, 能够增大回波能量, 但是与本文的QCA阵列相比, 采用UCCA阵列所需的阵元数更多。与基于UCA的方法相比, 本文所提方法在低信噪比环境下具有更小的均

方误差, 并且相比于基于UCA的涡旋电磁波成像方法来说, 所提方法能够更快地趋于收敛。观察图12(a)和图12(b)可以看到, 所提方法在低信噪比下获得的聚焦图像具有更低的图像熵, 通过对比这两个结果可以发现, 所提方法在低信噪比环境中具有更优的成像结果。

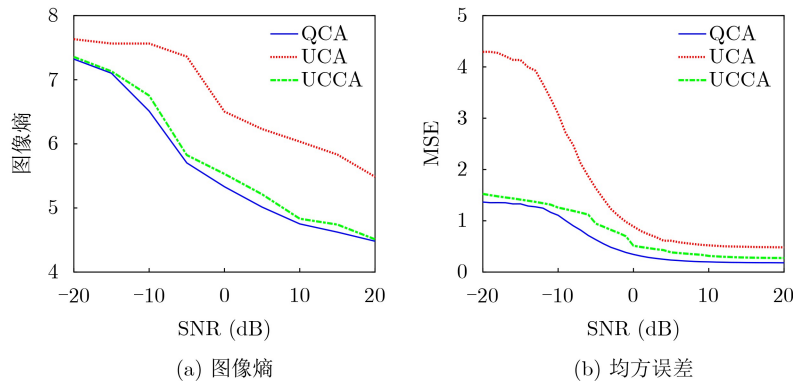


图 12 不同SNR下本文方法与对比方法重建图像的均方误差与图像熵

5 结论

针对涡旋电磁波主瓣发散, 在低信噪比下成像结果恶化与涡旋电磁波成像中信息获取过程中需要不断切换模态的问题, 本文提出了一种基于接收回波相位加权的准涡旋电磁波成像方法, 通过QCA生成主瓣集中的准涡旋电磁波照射成像区域, 并将接收到的单模态回波利用接收回波相位加权技术生成等效多模态回波用于成像处理。实验结果表明, 所提方法在低信噪比环境下能够有效地提高成像质量, 为涡旋电磁波雷达在低信噪比下成像提供了一条新的途径。未来, 我们拟对回波做进一步处理或采用QCA阵列对发射信号进行编码以进一步优化在低信噪比下的性能。

参考文献

- [1] DENG Yunkai, YU Weidong, WANG Pei, *et al.* The high-resolution synthetic aperture radar system and signal processing techniques: Current progress and future prospects [review papers][J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2024, 12(4): 169–189. doi: [10.1109/MGRS.2024.3456444](https://doi.org/10.1109/MGRS.2024.3456444).
- [2] CHEN Jianlai, XIONG Rongqi, YU Hanwen, *et al.* Microwave photonic synthetic aperture radar: Systems, experiments, and imaging processing [Technical Committees][J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2025, 13(2): 314–328. doi: [10.1109/MGRS.2024.3444777](https://doi.org/10.1109/MGRS.2024.3444777).
- [3] QIU Xiaolan, HU Donghui, and DING Chibiao. Some reflections on bistatic SAR of forward-looking configuration[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(4): 735–739. doi: [10.1109/LGRS.2008.2004506](https://doi.org/10.1109/LGRS.2008.2004506).
- [4] PENG Xueming, WANG Yanping, HONG Wen, *et al.* Autonomous navigation airborne forward-looking SAR high precision imaging with combination of pseudo-polar formatting and overlapped sub-aperture algorithm[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(11): 6063–6078. doi: [10.3390/rs5116063](https://doi.org/10.3390/rs5116063).
- [5] HODGSON J A and LEE D W. Terminal guidance using a Doppler beam sharpening radar[C]. *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, Austin, USA, 2003: 5796. doi: [10.2514/6.2003-5796](https://doi.org/10.2514/6.2003-5796).
- [6] CHEN Hongmeng, LI Ming, ZHANG Peng, *et al.* Resolution enhancement for Doppler beam sharpening imaging[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(7): 843–851. doi: [10.1049/iet-rsn.2014.0384](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2014.0384).
- [7] 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).
- [8] THIDÉ B, THEN H, SJÖHOLM J, *et al.* Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(8): 087701. doi: [10.1103/PhysRevLett.99.087701](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.087701).
- [9] 赵林军, 张海林, 刘乃安. 涡旋电磁波无线通信技术的研究进展[J]. *电子与信息学报*, 2021, 43(11): 3075–3085. doi: [10.11999/JEIT200899](https://doi.org/10.11999/JEIT200899).

ZHAO Linjun, ZHANG Hailin, and LIU Naian. Research

- status of vortex electromagnetic wave wireless communication technologies[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(11): 3075–3085. doi: [10.11999/JEIT200899](#).
- [10] LEE D, SASAKI H, YAGI Y, *et al.* Orbital angular momentum multiplexing using radio wave and its extension to multishape radio[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(7): 1985–1996. doi: [10.1109/JLT.2022.3223366](#).
- [11] BABIKER M, ANDREWS D L, and LEMBESSIS V E. Atoms in complex twisted light[J]. *Journal of Optics*, 2019, 21(1): 013001. doi: [10.1088/2040-8986/aaed14](#).
- [12] 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](#).
- [13] LIU Kang, LIU Hongyan, WANG Hongqiang, *et al.* Vortex electromagnetic wave imaging with orbital angular momentum and waveform degrees of freedom[J]. *Optics Express*, 2024, 32(8): 13574–13582. doi: [10.1364/OE.521640](#).
- [14] LIU Kang, CHENG Yongqiang, LI Xiang, *et al.* Microwave-sensing technology using orbital angular momentum: Overview of its advantages[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2019, 14(2): 112–118. doi: [10.1109/MVT.2018.2890673](#).
- [15] TAN Zhengkuan, LIU Kang, LIU Hongyan, *et al.* Monopulse electromagnetic vortex imaging method by multiplexing OAM modes based on frequency diversity[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(22): 37061–37071. doi: [10.1109/JSEN.2024.3473949](#).
- [16] ZHANG Lingling, ZHU Yongzhong, CHEN Yijun, *et al.* Three-dimensional micro-Doppler parameter estimation of rotor target based on VEMW radar[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(6): 10155–10162. doi: [10.1109/JSEN.2025.3533009](#).
- [17] 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](#).
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](#).
- [18] 潘浩然, 马晖, 胡敦法, 等. 基于涡旋电磁波新体制的雷达前视三维成像[J]. 雷达学报, 2024, 13(5): 1109–1122. doi: [10.12000/JR24123](#).
PAN Haoran, MA Hui, HU Dunfa, *et al.* Novel forward-looking three-dimensional imaging based on vortex electromagnetic wave radar[J]. *Journal of Radars*, 2024, 13(5): 1109–1122. doi: [10.12000/JR24123](#).
- [19] LIU Kang, LIU Hongyan, QIN Yuliang, *et al.* Generation of OAM beams using phased array in the microwave band[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(9): 3850–3857. doi: [10.1109/TAP.2016.2589960](#).
- [20] YAO A M and PADGETT M J. Orbital angular momentum: Origins, behavior and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 161–204. doi: [10.1364/AOP.3.000161](#).
- [21] LIU Hongyan, WANG Yu, WANG Jianqiu, *et al.* Electromagnetic vortex enhanced imaging using fractional OAM beams[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(6): 948–952. doi: [10.1109/LAWP.2021.3067914](#).
- [22] KUANG Feng, LIU Kang, LIU Hongyan, *et al.* Object imaging method with electromagnetic wavefront modulation in forward-looking sight[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(11): 3357–3361. doi: [10.1109/LAWP.2024.3456822](#).
- [23] MAO Rongrong, LIU Kang, LIU Hongyan, *et al.* Electromagnetic vortex imaging based on OAM multiplexing beam with orthogonal polyphase coding[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(24): 30786–30793. doi: [10.1109/JSEN.2023.3329359](#).
- [24] FOU DA R M, BAUM T C, and GHORBANI K. Quasi-orbital angular momentum (Q-OAM) generated by quasi-circular array antenna (QCA)[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 8363. doi: [10.1038/s41598-018-26733-6](#).
- [25] VENERI A, BURGHIGNOLI P, and COMITE D. Microwave imaging with circular arrays: Comparative analysis between OAM and MIMO[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2025, 73(5): 3015–3025. doi: [10.1109/TAP.2024.3516358](#).
- [26] YUAN Tiezhu, WANG Hongqiang, QIN Yuliang, *et al.* Electromagnetic vortex imaging using uniform concentric circular arrays[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 1024–1027. doi: [10.1109/LAWP.2015.2490169](#).
- 舒高峰: 男, 副教授, 研究方向为SAR信号处理。
魏奕鑫: 男, 硕士生, 研究方向为涡旋电磁波雷达前视成像。
李 宁: 男, 教授, 研究方向为合成孔径雷达成像与对抗。

责任编辑: 陈 倩

Quasi-Vortex Electromagnetic Wave Radar Forward-Looking Imaging based on Echo Phase Weighting

SHU Gaofeng WEI Yixin LI Ning

(School of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, China)

(Henan Key Laboratory of Big Data Analysis and Processing, Henan University, Kaifeng 475004, China)

(Henan Engineering Research Center of Spatial Information Processing, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract:

Objective Forward-looking radar imaging plays a critical role in multiple applications. Numerous algorithms have been proposed to enhance azimuth resolution; however, improvement remains difficult due to the limitations imposed by antenna aperture. Existing high-resolution techniques, including synthetic aperture radar and Doppler beam sharpening, rely on Doppler bandwidth and inevitably create blind spots in the forward-looking region. Vortex electromagnetic waves carrying orbital angular momentum offer potential in forward-looking scenarios because of the orthogonality between different orbital angular momentum modes. In conventional vortex electromagnetic wave imaging, a Uniform Circular Array (UCA) is used to generate and transmit multi-mode vortex electromagnetic waves. Yet, the UCA-generated waves suffer from main lobe divergence, which disperses energy and weakens echo signals, while multi-mode transmission increases system complexity. To address these issues, this paper proposes a Quasi-Circular Array (QCA) that reduces system complexity, produces vortex electromagnetic waves with more concentrated main lobes, and preserves phase linearity. In addition, a post-processing method based on echo phase weighting is introduced. By applying phase modulation to the single-mode echo received by each antenna element, a complete equivalent multi-mode echo is synthesized. The proposed method enhances azimuth resolution and exhibits strong anti-noise performance.

Methods To obtain clear images under low Signal-to-Noise Ratio (SNR) conditions, a phase modulation echo post-processing method combined with a QCA is proposed. The QCA first generates a single-mode vortex electromagnetic wave to illuminate the region of interest. Each element of the array then receives and stores the echo. Phase modulation is subsequently applied to the stored echo to generate signals of specific modes, thereby synthesizing an equivalent multi-mode echo with enhanced amplitude that preserves target information. This approach demonstrates strong potential for practical applications in forward-looking radar imaging under low SNR conditions.

Results and Discussions When noise is added to the echo and imaging is performed (Figure 11), the proposed method achieves superior results under noisy conditions. As noise intensity increases, a clear target can still be reconstructed at an SNR of -10 dB. Even when the SNR is reduced to -15 dB and the target is submerged in noise, the contour features of the reconstructed target remain distinguishable. These results demonstrate that the method has strong anti-noise performance. In addition, when imaging is performed within a smaller mode range, the azimuth resolution achieved by the proposed method improves by an average factor of 2.2 compared with the traditional method (Figure 9). The improvements in resolution and anti-noise performance can be attributed to two factors: (1) The vortex electromagnetic waves generated by the QCA experience reduced destructive interference due to the asymmetric spatial distribution of array elements, producing waves with more concentrated main lobes, lower side lobes, and higher radiation gain. (2) Applying phase modulation in echo processing reduces the pulse repetition frequency of the vortex electromagnetic wave at the transmitting end, thereby lowering system complexity.

Conclusions This study proposes a method capable of effective imaging under low SNR conditions. The echo expression of the electric field generated by the QCA is derived, and the radiation gain and phase characteristics of the quasi-vortex electromagnetic wave are analyzed. In addition, an echo post-processing method based on phase modulation is introduced. Simulation results demonstrate that, compared with the traditional UCA method, the proposed approach generates vortex electromagnetic waves with more concentrated main lobes, lower side lobes, and higher gain, while improving azimuth resolution by a factor of 2.2. Even at a SNR of -15 dB, the reconstructed imaging results remain distinguishable.

Key words: Vortex electromagnetic waves; Radar forward-looking imaging; Quasi-circular array; Echo phase weighting