

基于涡旋电磁波新体制的雷达前视三维成像

潘浩然 马晖* 胡敦法 刘宏伟

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 涡旋电磁波具有独特的波前相位调制特性, 其作为一种新的雷达发射端分集模式, 可实现目标雷达截面积(RCS)分集、提升信号与信息处理维度和性能, 其探测与成像性能在多种雷达体制中得到了验证。该文针对前视雷达成像的应用背景, 基于均匀圆阵发射与圆阵中心单天线接收的收发体制, 在建立了电磁涡旋前视雷达信号模型与成像模型的基础上, 提出了一种分时多模式扫描的成像方法, 利用多模式涡旋电磁波在不同俯仰角的幅度差异性和在不同方位角的相位差异性, 以及雷达与目标相对运动产生的多普勒效应, 提出了改进的后向投影-距离多普勒算法, 实现了目标三维成像。由于涡旋电磁波的能量发散特点, 随着俯仰角增大, 高模式方向图增益急剧下降, 该文所提方法通过对多个模式在空域能量分布的有效利用, 在较大视场角下具有较高的稳定性。基于点目标成像结果, 验证了在多模式涡旋波覆盖的较大视场范围内, 目标成像结果的归一化等效增益在低俯仰角与高俯仰角处基本相当。所提方法通过对飞机目标的实验验证, 根据成像结果可较为准确地重构目标的三维结构。

关键词: 涡旋电磁波雷达; 前视三维成像; 分时多模式; 后向投影算法; 距离多普勒

中图分类号:

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2024)x-0001-14

DOI: 10.12000/JR24123

引用格式: 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(中英文), 待出版. doi: 10.12000/JR24123.

Reference format: PAN Haoran, MA Hui, HU Dunfa, *et al.* Novel forward-looking three-dimensional imaging based on vortex electromagnetic wave radar[J]. *Journal of Radars*, in press. doi: 10.12000/JR24123.

Novel Forward-looking Three-Dimensional Imaging Based on Vortex Electromagnetic Wave Radar

PAN Haoran MA Hui* HU Dunfa LIU Hongwei

(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Vortex Electromagnetic Waves (VEMWs) have unique wavefront phase modulation characteristics. As a new degree of freedom in the diversity of radar transmitters, the VEMW Radar (VEMWR) provides radar cross-section diversity and improves signal and information processing dimensions and performances. The detection and imaging performances of VEMWR have been verified in various radar systems. This article focuses on the applying background of forward-looking radar imaging and proposes a time-division multiple-mode scanning imaging method based on a Uniform Circular Array (UCA) system with multiple transmitters and a single receiver at the UCA center. First, we establish the forward-looking VEMWR imaging mode and corresponding signal mode. Next, an improved three-Dimensional (3D) back-projection and range-Doppler

收稿日期: 2024-06-19; 改回日期: 2024-09-02; 网络出版: 2024-xx-xx

*通信作者: 马晖 h.ma@xidian.edu.cn *Corresponding Author: MA Hui, h.ma@xidian.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3902400), 国家自然科学基金面上基金(62471362), 国家自然科学基金青年基金(61901344), 博士后创新人才支持计划(BX20180239), 博士后基金(2019M653562), 高等学校学科创新引智计划(B18039)

Foundation Items: The National Key R&D Program of China (2022YFB3902400), The National Natural Science Foundation of China under Grant (62471362), The National Nature Fund Youth Fund (61901344), The Postdoctoral Innovative Talent Support Program (BX20180239), The Postdoctoral Fund (2019M653562), The Discipline Innovation and Talent Introduction Program of Colleges and Universities (B18039)

责任编辑: 刘康 Corresponding Editor: LIU Kang

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License

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

algorithm is proposed, which utilizes the magnitude difference at various elevation angles of multimode VEMW, phase difference at different azimuth angles, and Doppler effect resulting from the relative motion of the radar and target to achieve 3D imaging of the target. As the elevation angle increases, the beam pattern gain of the high-mode VEMW decreases sharply due to the energy divergence of the VEMW. The proposed method can maintain stability at low or high elevation angles using the energy distribution of multiple modes in the spatial domain. Imaging results of point targets revealed that the normalized gain of target-imaging results is equivalent either at low or high elevation angles within the multimode VEMW field of view. The proposed method is validated through experiments with an aircraft target. Based on the imaging results, it is verified that the proposed method can accurately reconstruct the 3D structure of complex targets.

Key words: Vortex Electromagnetic Wave Radar (VEMWR); Forward looking three-Dimensional imaging; Time Division Multiple Modes (TDMM); back-projection algorithm (BPA); Range Doppler

1 引言

成像雷达因其稳定性及高分辨率的优势,在军事侦查和民用勘测领域得到广泛应用。其中,成像体制以合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)为代表^[1,2];但传统SAR成像技术和多普勒波束锐化技术(Doppler Beam Sharpening, DBS)受限于成像机理,无法满足正前视区域成像的需求;对于斜视SAR和侧视SAR的成像模式,其应用均存在一定的局限性^[3]。此外,SAR成像性能在积累时间、波束分辨瑞利限、信噪比等因素的制约下,对抗复杂电磁环境的应用性能受到极大挑战。

涡旋电磁波成像雷达采用一种新型成像体制,其波前相位受轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)调制^[4,5],从而形成特定的相位分布,理论上可以生成无数种正交的调制模式,使得涡旋电磁波在数学处理上更为简便,可以提升成像分辨率、算法效率等性能。针对电磁涡旋雷达应用,学者开展了实孔径成像、SAR以及ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar)等一系列研究^[6-8],并且在典型前视雷达成像应用中,展示出优异性能^[9]。

在涡旋雷达成像算法方面,2013年郭桂蓉等人^[10]对电磁涡旋雷达成像的机理与可行性方面进行了研究,为涡旋波在雷达成像感知领域的应用奠定了基础。2018年前后,学者结合SAR体制对单一模态下的二维成像^[11]与多模态三维合成孔径成像^[12]等开展了系列研究,研究结果表明,电磁涡旋可以用于SAR成像且成像效果优于平面波。2019年,Fang等人^[13]改进了对传统的Chirp Scaling算法,实现了电磁涡旋波合成孔径雷达成像,Bu等人^[14]将涡旋电磁波与合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术相结合对目标进行了三维成像。2020年,袁航等人^[15]将涡旋电磁波应用于对人体步态的识别,建立了人体目标的涡旋电磁波雷达回波模型。2022年,学

者对涡旋雷达高分辨技术进行研究^[16],力求突破现有的成像分辨率限制,实现涡旋电磁波的高精度成像。

在前视雷达成像应用中,较大视场角下的前视三维成像算法的研究尚未成熟,电磁涡旋雷达成像的研究仍处于起步阶段。为了解决在较大视场角的场景精确成像的问题,本文采用分时独立发射的多模态涡旋电磁波扫描方式,从前视雷达成像场景与均匀圆阵的几何构型出发构建了涡旋回波信号模型;在原有后向投影(Back Projection, BP)算法的基础上添加了对较大视场角的多普勒网格与贝塞尔幅度补偿,并利用目标涡旋方位角与OAM模态的对偶关系,获取目标方位-俯仰信息。在得到的成像结果下定义了信号处理增益,并计算了信号处理增益随俯仰角变化的趋势,对于实际场景要求的俯仰角,信号处理增益的最大衰减不超过-1.8 dB,算法将分布在各个模态的能量利用起来,有较好的成像性能。最后对涡旋雷达的前视场景的距离-俯仰-方位三维成像进行了仿真与实测分析,算法在实测场景也有较好的表现。并对输出信噪比与信号处理增益进行分析。

2 成像几何模型

电磁涡旋场是一种由多个激励源组合形成的场,可以通过如多点、线、面激励源等多种方式来生成。均匀圆阵(Uniform Circular Array, UCA)体制利用多通道相控方法实现不同波束模式的调控,系统具有较强的灵活性和可变性;它可同时激励多种模态的涡旋波,因此成为电磁涡旋雷达系统的理想方案之一。图1所示的前视涡旋雷达的成像模型中,电磁涡旋成像的方位角分辨力来源于多模态涡旋波的差异性空域相位调制,距离向分辨力则基于信号带宽。不失一般性的以目标区域为参考系,以平台的初始位置为坐标原点建立直角坐标系 $O-XYZ$,

平台沿 X 轴移动, 移动速度为 v_η , 成像区域在雷达移动方向的前侧方。

放大图1的细节, 在UCA本地坐标系下的目标各参数定义如图2所示。在慢时间 η 时刻, 以平台当前位置 $(x_\eta, 0, 0)$ 为原点建立直角坐标系 $O'-XYZ$ 则UCA所在平面为 $YO'Z$ 平面, N 个发射天线均匀地分布在圆心为 O' , 半径为 r_a 的圆周上, 接收天线位于 $YO'Z$ 平面的原点 O' , 目标到接收天线的距离定义为目标的斜距 r_m ; 目标的俯仰角 θ_m 定义为斜距与 X 轴之间的夹角; 目标方位角 φ_m 定义为斜距在 $YO'Z$ 平面上的投影与 Y 轴正方向的夹角。

3 回波信号建模

本文的发射信号采用如图3所示的分时多模式方式, 每个发射阵元的时域波形根据当前模式增加初相调制。其中, 每一个模式的脉冲持续时间均为 T_p , 雷达在一个周期内顺次发射 N_α 个模式的涡旋波, 总积累时长 $T = N_\alpha K_n T_p$ 。

分时多模式对系统的要求较低, 能够很好地兼容传统的SAR雷达系统, 与基于波形分集实现OAM解调的同时多模式的发射机制^[18]相比, 它能够快速地进行大空域的扫描, 在一个周期内获取更多的空域信息。由于各个模式的信号在时间上的独立性, 无需OAM解调即可分离多模式的信号, 加快了算法的处理速度, 更适用成像范围大, 少快拍实时成像的机载或者弹载雷达场景。但无论哪一种

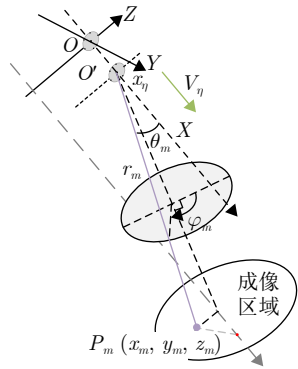


图1 涡旋雷达前视成像几何模型

Fig. 1 Geometry of vortex radar forward-looking imaging

波形发射方式, 其目的是获取不同模式维的信息, 本文后续所提出的成像方法仍然适用。

均匀圆阵列的每一个阵元发射带宽为 B 、调频率为 K , 幅度相同的线性调频信号。每一个阵元的方位角 $\phi_n = 2\pi(n-1)/N, n = 1, 2, \dots, N$, N 为阵元个数。为了在远场合成模式为 α 的涡旋波, 需要对阵元施加不同的相移。第 n 个阵元的发射信号为

$$S_n(\alpha, t) = p(t) \cdot \exp(j\alpha\phi_n), n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中, t 为快时间变量。 $p(t)$ 为线性调频波包络, 具体表达式为

$$p(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \cdot \exp(j\pi K \cdot t^2) \quad (2)$$

其中, T_p 为一个模式的脉冲持续时间。根据图1、图2的前视成像几何模型与UCA阵元位置关系, 在 $YO'Z$ 平面上第 n 个阵元的矢量向量为 $\mathbf{r}_n = r_a(\hat{\mathbf{y}} \cos \phi_n + \hat{\mathbf{z}} \sin \phi_n)$, 其中 $\hat{\mathbf{y}}, \hat{\mathbf{z}}$ 为 Y 轴与 Z 轴的单位向量 r_a 为UCA阵元半径, 远场目标 $p_m(r_m, \theta_m, \varphi_m)$ 的场点矢径 \mathbf{r}_m 的单位向量为 $\hat{\mathbf{r}}_m = \hat{\mathbf{y}} \sin \theta_m \cos \varphi_m + \hat{\mathbf{z}} \sin \theta_m \sin \varphi_m + \hat{\mathbf{x}} \cos \theta_m$, 则第 n 个发射阵元到目标的实际距离为 $|\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n|$, 目标到接收阵元的距离为 $|\mathbf{r}_m| = r_m$, 在此双程作用下, 接收阵元处的脉冲回波信号为

$$S_{\text{in}}(\alpha, t) = \sum_{n=1}^N \sigma_m \cdot p(t - \tau_m) \cdot \exp(j\alpha\phi_n) \cdot \exp[j2\pi f_d(t - \tau_m)] \cdot \exp[-jk(r_m + |\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n|)] \quad (3)$$

其中, σ_m 为后向散射系数, $\tau_m = 2r_m/c$, c 为光

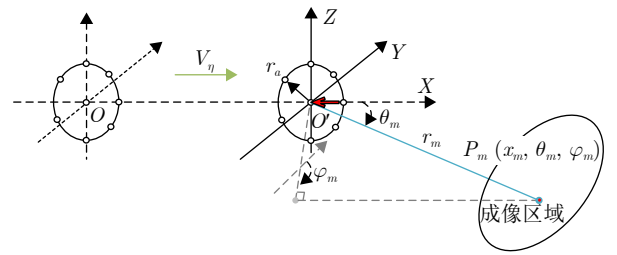


图2 涡旋雷达前视成像坐标系

Fig. 2 The coordinate system of vortex radar forward-looking imaging

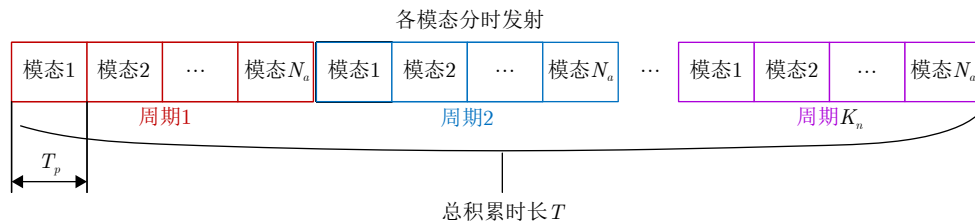


图3 分时多模式发射模式示意图

Fig. 3 Procedure of time division multiple modes

速, $\exp[-jk(r_m + |\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n|)]$ 为传播相位, k 为信号的波数, $k = 2\pi/\lambda\lambda$ 为信号波长, f_c 为信号载频, f_d 为多普勒频移, 在远场条件下可用 $r_m + |\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n| \approx 2r_m - \hat{\mathbf{r}}_m \cdot \mathbf{r}_n = 2r_m - r_a \sin\theta_m \cos(\varphi_m - \phi_n)$ 对传播相位作近似, 则式(3)可近似为

$$S_{\text{nr}}(\alpha, t) = \sigma_m \cdot p(t - \tau_m) \cdot \exp[j2\pi f_d(t - \tau_m)] \cdot \sum_{n=1}^N \{ \exp(j\alpha\phi_n) \cdot \exp(-j2kr_m) \cdot \exp[jk \cdot r_a \sin\theta_m \cos(\varphi_m - \phi_n)] \} \quad (4)$$

当阵元数量 N 足够多时, 式(4)中的求和可近似使用积分替换, 可改写为

$$\begin{aligned} S_{\text{nr}}(\alpha, t) &\approx \sigma_m \cdot p(t - \tau_m) \cdot \exp[j2\pi f_d(t - \tau_m)] \\ &\cdot \exp(-j2kr_m) \cdot \frac{N}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(j\alpha\phi) \\ &\cdot \exp[jk \cdot r_a \sin\theta_m \cos(\varphi_m - \phi)] d\phi \\ &\stackrel{\varphi_m - \varphi = \phi}{=} \sigma_m \cdot p(t - \tau_m) \\ &\cdot \exp[j2\pi f_d(t - \tau_m)] \cdot \exp(-j2kr_m) \\ &\cdot \frac{N}{2\pi} \exp(j\alpha\varphi_m) \int_0^{2\pi} \exp(-j\alpha\varphi) \\ &\cdot \exp[jk \cdot r_a \sin\theta_m \cos\varphi] d\varphi \\ &= Nj^\alpha \sigma_m \cdot p(t - \tau_m) \cdot \exp[j2\pi f_d(t - \tau_m)] \\ &\cdot \exp(-j2kr_m) \cdot \exp(j\alpha\varphi_m) \\ &\cdot J_\alpha(k \cdot r_a \sin\theta_m) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $J_\alpha(\cdot)$ 为 α 阶的第一类贝塞尔函数, 式(5)利用了贝塞尔函数的积分形式^[17]的变换:

$$\begin{aligned} J_\alpha(kr_a \sin\theta_m) &= \frac{j^\alpha}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \exp(-jkr_a \sin\theta_m \cos\varphi) \\ &\cdot \exp(-j\alpha\varphi) d\varphi \\ &= \frac{(-1)^\alpha j^\alpha}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \exp(jkr_a \sin\theta_m \cos\varphi) \\ &\cdot \exp(-j\alpha\varphi) d\varphi \end{aligned} \quad (6)$$

考虑到成像场景下雷达与目标的相对运动, 多个散射目标的斜距 r_m 与俯仰角 θ_m , $m = 1, 2, \dots, M$ 随慢时间 η 变化, 可得到 M 点的复杂目标在成像过程中的回波表达式:

$$\begin{aligned} S_r(t, \alpha, \eta) &= Nj^\alpha \cdot \sum_{m=1}^M \{ \sigma_m J_\alpha[kr_a \cdot \sin\theta_m(\eta)] \\ &\cdot \exp(j\alpha\varphi_m) \cdot \exp[j2\pi f_d(t - \tau_m)] \\ &\cdot \exp[-j2kr_m(\eta)] \\ &\cdot \text{rect}\left[\frac{t - 2r_m(\eta)/c}{T_p}\right] \\ &\cdot \exp\left[j\pi K(t - 2r_m(\eta)/c)^2\right] \} \end{aligned} \quad (7)$$

4 成像处理算法

4.1 基于后向投影-距离多普勒的目标三维成像

成像处理目的是从距离-俯仰-方位多维度耦合的回波相位中分离出目标信息。本文所提出的整体算法流程如图4所示, 首先基于匹配滤波方法实现距离压缩; 其次, 根据后向投影算法划分距离网格和俯仰网格, 并在此基础上添加多普勒网格。然后, 将网格在慢时间上投影的同时进行相位与幅度补偿, 获得匹配的目标俯仰信息; 最后对模态维做傅里叶变换获得目标的方位信息, 在多普勒维非相干积累, 获取更多离网目标信息, 提升目标信噪比。

对式(7)的信号进行脉冲压缩后得到的回波表达式为

$$\begin{aligned} S_{\text{rcomp}}(t, \alpha, \eta) &= Nj^\alpha \cdot \sum_{m=1}^M \{ \sigma_m J_\alpha[kr_a \cdot \sin\theta_m(\eta)] \\ &\cdot \exp(j\alpha\varphi_m) \cdot \exp[-j2kr_m(\eta)] \\ &\cdot p_r(\cdot) \} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $p_r(\cdot) = |K|T_p \cdot \text{sinc}\{|K|T_p \cdot (t - 2r_m(\eta) - f_d/K)\}$ 为匹配滤波处理后的距离包络。

对于每一组模态-慢时间采样数据, 反射波信号代表了该模态主副瓣照射范围内目标散射特性的总和, 其中包含了目标距离单元、传播相位、当前模态的涡旋相位、雷达与目标相对运动与多普勒频移带来距离徙动相位。

BP算法首先将场景网格化, 在慢时间采样点上, 根据每个网格点的斜距, 在回波信号中选取对应距离单元, 计算网格点对应的相位因子进行相位补偿, 最后将相位补偿后的信号叠加为网格点上的成像图。因此, BP算法本质上是针对所有网格点在时域上设计了相应的匹配滤波器, 可有效解决回

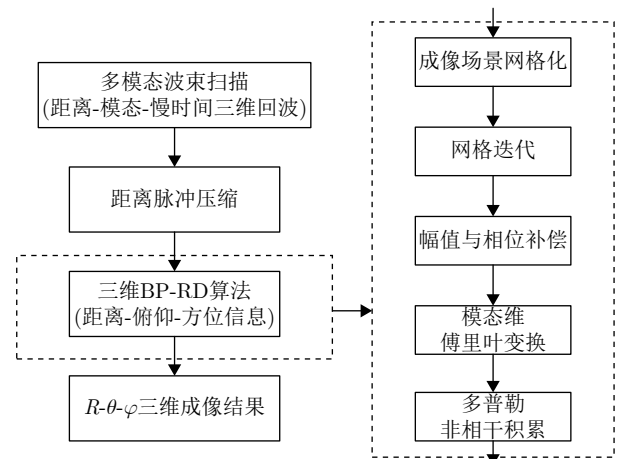


图4 成像算法处理过程

Fig. 4 Flowchart of the proposed imaging algorithm

波信号相位中空域多维度难以解耦的问题, 但是, 在较大视场角的情况下, 由于BP网络的划分限制, 低密度的网络会大量丢失离网目标的信息, 高密度的网络会大大增加算法的运算量, 如何在不添加网络数量的情况获取更多目标信息, 成为少快拍大空域成像急需解决的问题。

本文将多普勒偏移与BP算法相结合, 在BP算法中根据已知的相对速度信息添加多普勒网格, 补偿多普勒频率变化在距离与俯仰角网格变换时带来的距离偏移; 并考虑到少快拍成像场景的算法运算量问题, 对BP-RD网络的投影计算过程进行线性替代。无论图3中的分时多模态发射模式还是基于波形分集的同时多模态体制, 均可基于BP-RD算法对于多维耦合的相位信息进行精确补偿后实现目标点聚焦。接下来对BP-RD成像算法的实现流程进行详细介绍。

(1) 成像场景网格化

当平台位于起始点 O 时, 将成像场景划分为三维 $(R_g, \theta_g, \varphi_g)$ 网格, 如图5所示。距离网格沿雷达视线方向延伸; 以雷达视线与 Y 轴夹角增大方向划分方位角网格 φ_g , 最大可划分范围为 $-\pi \sim \pi$; 以雷

$$\begin{cases} R_\eta(R_g, \theta_g) = R_g \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \frac{x_\eta}{R_g} \cos \theta_g + \left(\frac{x_\eta}{R_g}\right)^2} = R_g - \cos \theta_g \cdot x_\eta \\ \theta_\eta(R_g, \theta_g) = \arccos \left(\frac{\cos^2 \theta_g}{\sqrt{1 - 2 \cdot \frac{x_\eta}{R_g} \cos \theta_g + \left(\frac{x_\eta}{R_g}\right)^2}} \right) = \theta_g - \frac{\cos^2 \theta_g}{2 \sin \theta_g} \cdot \frac{x_\eta}{R_g} \end{cases} \quad (10)$$

(3) 贝塞尔幅度调制与传播相位补偿

由式(8)可知, 贝塞尔函数将目标的俯仰维信息与不同模式的涡旋波束方位图耦合, 导致了不同俯仰角的信息在模态维信号幅度谱上受贝塞尔函数的调制; 影响了目标方位角与OAM模式的对称关系, 使得信号在方位向成像时的脉冲旁瓣被抬高,

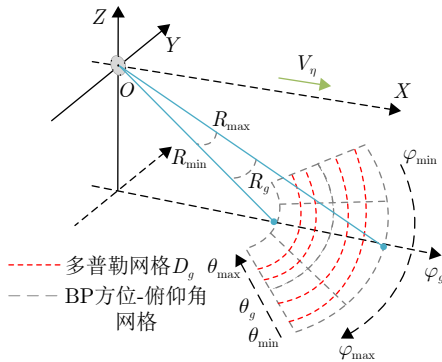


图 5 三维成像网络

Fig. 5 Gridding the imaging scenario

达视线与 X 轴夹角增加方向划分俯仰角网格 θ_g , 最大可划分范围为 $0 \sim \pi/2$ 。最后在已经划分好的距离维与俯仰维上添加多普勒网格 D_g , 具体计算方式见式(9)。在实际应用中可以根据前视雷达参数以及具体成像需求缩小网格划分范围, 加快运算速度, 降低运算量。

(2) 俯仰角变换与计算距离多普勒延迟

根据图6所示的雷达运动轨迹与场景网格之间的几何关系, 在当前航迹采样点, 将起始点网络变换迭代到真实距离和俯仰角网格上。网络的变换表达式为

$$\begin{cases} R_\eta(R_g, \theta_g) = \sqrt{R_g^2 - 2R_g x_\eta \cos \theta_g + x_\eta^2} \\ \theta_\eta(R_g, \theta_g) = \arccos(R_g \cos \theta_g / R_\eta) \\ D_g(R_g, \theta_g) = v_\eta c \cdot \cos[\theta_\eta(R_g, \theta_g)] / \lambda K \end{cases} \quad (9)$$

其中, v_η 为平台速度, $x_\eta = \int v_\eta d\eta$ 为整个航迹位置采样点的位置 X 轴坐标, λ 为信号波长, K 为信号的调频率。在前视雷达少快拍的成像条件下, $x_\eta \ll R_g$, 对 R_g 和 θ_g 在 $x_\eta / R_g \rightarrow 0$ 处进行一阶泰勒展开:

甚至产生栅瓣干扰。对此, 需要在BP-RD算法中对贝塞尔函数进行补偿, 抑制栅瓣, 尽可能地消除贝塞尔函数对后续累积的影响。本文采用的正负整数模态的发射模式下, 贝塞尔函数在模态维上呈现如式(11)的对称性质^[9]:

$$J_{-\alpha}(\theta) = \begin{cases} -J_\alpha(\theta), & \alpha \text{ 为奇数} \\ J_\alpha(\theta), & \alpha \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (11)$$

因此, 在对奇数阶模态的信号进行累加时会出

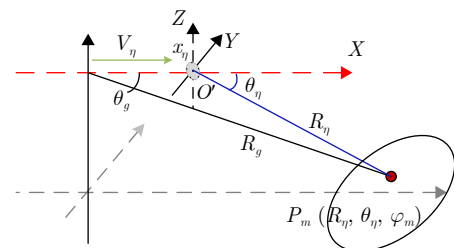


图 6 网络变换关系示意图

Fig. 6 The grid projection of range and elevation

现幅值相消的现象。由于BP算法类似于匹配滤波器的特性,当补偿因子与输入信号为复共轭时,输出信噪比达到最大。采用共轭式(11)不仅可以消除贝塞尔函数在模态维上幅值相消的现象,同时取得最大的信噪比。

$$H_\alpha = (-j)^\alpha \cdot J_\alpha(kr_a \sin\theta_\eta) \cdot \exp[j4\pi f_c R_\eta(R_g, \theta_g)/c] \quad (12)$$

(4) 模态维傅里叶变换与多普勒非相干叠加

由于涡旋目标方位角 φ_m 和OAM模态数 α 之间的对偶关系,经典谱估计方法即可得到目标的方位向轮廓。将每个网格中投影的回波与补偿因子 H_α 相乘,消除距离和相位偏移的影响后,在模态维傅里叶变换,在多普勒维进行非相干叠加,得到式(13)中对目标区域的成像结果。对于没有目标散射点分布的网格点,叠加后能量值较小。在对具有目标散射点分布的网格上的回波叠加时,可以累积能量,产生图像峰值。

$$\delta(R_g, \theta_g, \varphi_g) = \sum_f |\text{fft}_\eta \{ \text{fft}_\alpha \{ S_{\text{rcomp}} [2(R_\eta + D_\eta) / c, \alpha, \eta] \cdot H_\alpha \} \}|^2 \quad (13)$$

其中, f 为多普勒频率,根据帕塞瓦定理,得到最终的信号表达式:

$$\delta(R_g, \theta_g, \varphi_g) = \sum_\eta |\text{fft}_\alpha \{ S_{\text{rcomp}} [2(R_\eta + D_\eta) / c, \alpha, \eta] \cdot H_\alpha \}|^2 \quad (14)$$

4.2 成像性能分析

在对成像性能分析之前,有必要先对阵列合成效果进行分析。下图中的仿真参数设置为:UCA半径 12λ ,模态范围为 $[-34, 34]$,目标俯仰角分别设为 0.10π 与 0.17π 。

由图7可见,在低仰角、低模态的情况下,少量阵元也能有很好的拟合效果,但是随着俯仰角与模态数的增加,所需要的阵元个数也增加;在前视雷达的应用场景下,64阵元能得到不失真的最大模态范围为 $[-31, 31]$,对应的俯仰角为 0.15π ,满足前视空域的要求。本文后续基于64阵元合成涡旋波对成像性能进行分析。

64阵元合成的涡旋波如图8所示,仿真参数为阵元半径 12λ ,模态范围 $[-34, 34]$,如图8所示随着俯仰角的增加,能量越发分散于各个模态之中,俯仰角在 $0 \sim 0.15\pi$ 增大时,系统的峰值响应逐步减小, 0.15π 达到最低 -13 dB。在 0.15π 后由于涡旋波的失真,高模态破坏了贝塞尔函数的调制关系,峰值响应位置偏移,峰值响应值增大。以 0.16π 为

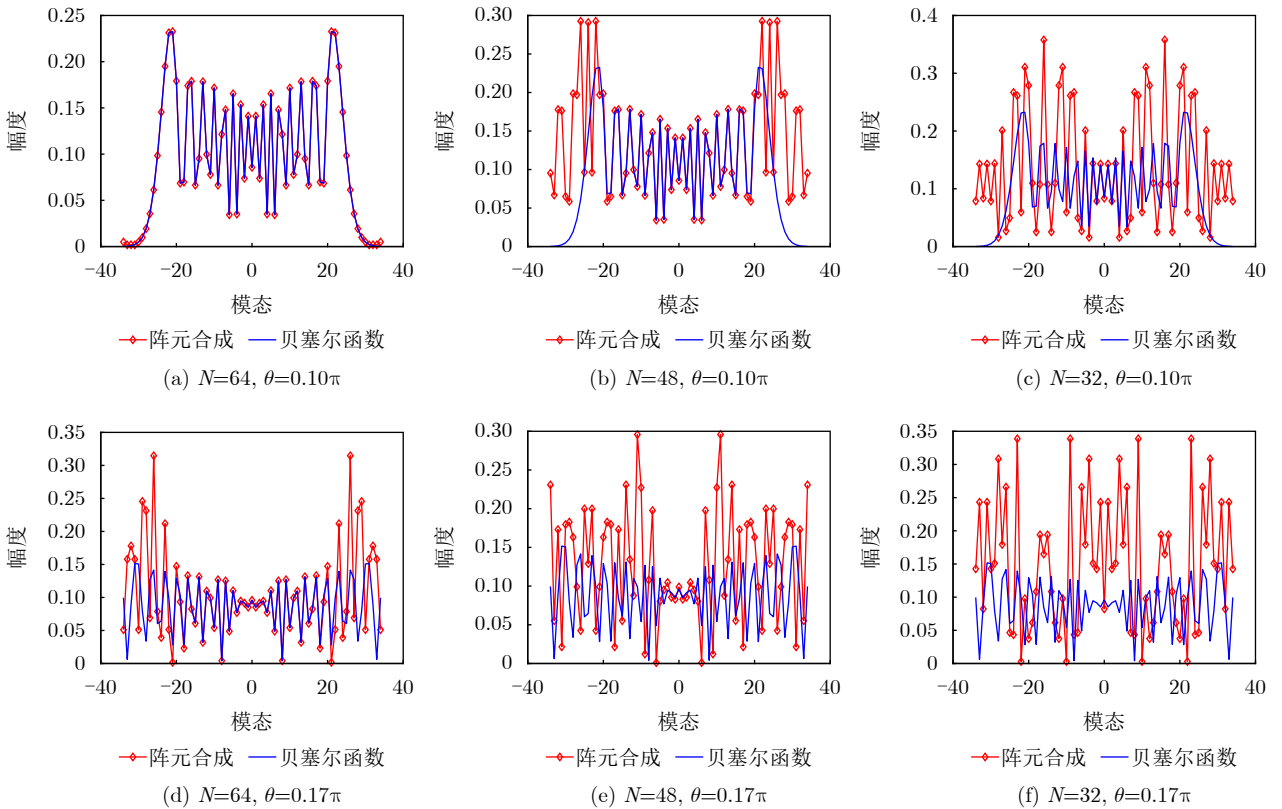


图7 阵元合成效果图

Fig. 7 Rendering of array synthesis

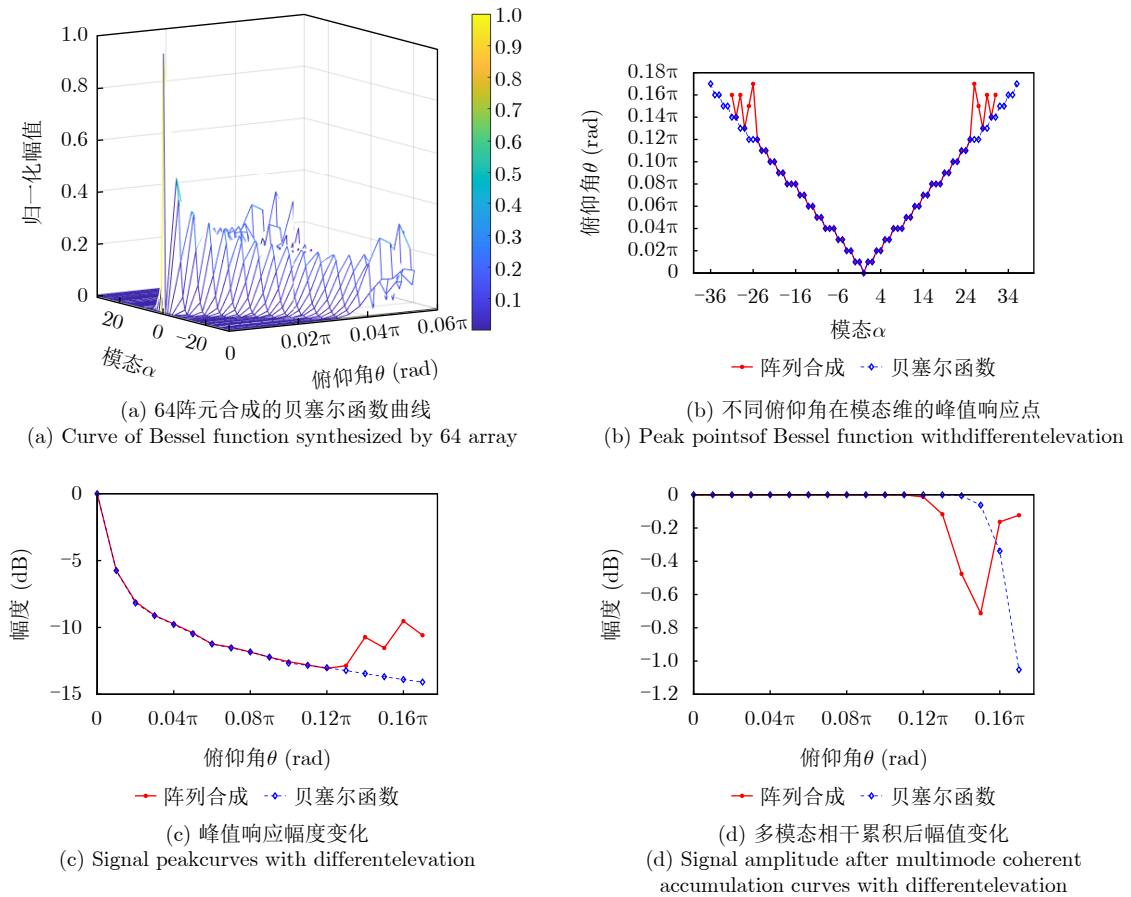


图 8 贝塞尔函数幅度调制影响

Fig. 8 Amplitude modulation of Bessel functions

表 1 不同俯仰位置下信号处理增益变化

Tab. 1 Signal processing gain of different elevation

俯仰角 θ (rad)	有效模态	输入信 噪比(dB)	输出信 噪比(dB)	归一化信号处理 增益 (dB)
0.00 π	[0]	12.4140	52.3270	39.9130
0.01 π	[-2,2]	12.4140	52.3231	39.9091
0.02 π	[-4,4]	12.4140	52.3115	39.8975
0.03 π	[-6,6]	12.4140	52.2922	39.8782
0.04 π	[-8,8]	12.4140	52.2653	39.8513
0.05 π	[-10,10]	12.4140	52.2307	39.8167
0.06 π	[-12,12]	12.4140	52.1887	39.7747
0.07 π	[-14,14]	12.4140	52.1393	39.7253
0.08 π	[-16,16]	12.4140	52.0826	39.6686
0.09 π	[-18,18]	12.4140	52.0188	39.6048
0.10 π	[-20,20]	12.4140	51.9482	39.5342
0.11 π	[-23,23]	12.4133	51.8693	51.4341
0.12 π	[-25,25]	12.4010	51.7580	39.3570
0.13 π	[-27, 27]	12.2969	51.4341	39.1372
0.14 π	[-28, 28]	11.9384	50.5159	38.5775
0.15 π	[-30, 30]	11.7014	49.8458	38.1444
0.16 π	[-32, 32]	12.2512	51.0137	38.7625
0.17 π	[-34, 34]	12.2907	50.9907	38.7001

例，在图8(b)、图8(c)中当俯仰角为 0.16π 时贝塞尔函数的峰值响应点应位于 ± 34 模态，但阵元合成信号在模态上的峰值响应位于 ± 31 模态，且峰值响应值提高了4 dB。因此，在高模态存在失真，且高俯仰角峰值响应最大变化量为-13 dB的幅度调制下，有必要验证算法能否得到较高的信号处理增益，获得好的成像性能。表1列举了目标在不同俯仰位置下，信号处理增益的变化，图9以俯仰角为0时的信号处理增益为基准对信号处理增益进行归一化。为尽量贴近真实环境，本文添加接收机噪声，并计算多模态的信噪比作为输入信噪比。

$$\text{SNR}_{\text{in}} = 10 \lg \left(\frac{P_r}{N_\alpha \cdot P_{N_0}} \right) \quad (15)$$

其中， P_r 为多模态的无噪声的回波信号总功率， P_{N_0} 为接收机噪声， N_α 为发射的涡旋波模态个数。

设在无目标的环境下的噪声信号的成像图幅值为 δ_{noise} ，有目标情况下输入雷达的成像图幅值为 δ_{tar} 。取 δ_{tar} 在3 dB主瓣宽度上的信号为 δ_3 dB，该区域可被认为是目标的多模态成像的响应，则输出信噪比可以被定义为

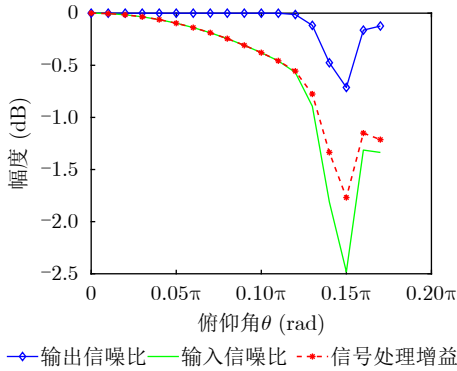


图9 归一化信号处理增益变化图(以俯仰角 $\theta=0$ 为参考点进行归一化)

Fig. 9 Signal processing gain curves with different elevation (based on zero angle, normalized signal processing gain)

$$\text{SNR}_{\text{out}} = 10 \lg \left(\frac{\sum \delta_3 \text{ dB}}{\sum \delta_{\text{noise}}} \right) \quad (16)$$

在此基础上, 信号处理增益 G 是指在经过信号处理后, 使信号增强的同时, 抑制输入噪声能力的大小, 定义为

$$G = \text{SNR}_{\text{out}} - \text{SNR}_{\text{in}} \quad (17)$$

从图9与表1中可以看出, 在多模态覆盖的目标区域内, 低俯仰角处有效模态数较少, 但是各模态对应的幅度方向图增益值高; 高俯仰角的情况则与之相反; 当俯仰角在 $[0, 0.15\pi]$ 变化时, 进行累加处理后, 归一化的等效增益(模态增益+累加处理增益)随着俯仰角的增大呈下降趋势, 其最大损失为 -1.77 dB。俯仰角为 0.16π 与 0.17π 时出现了输入信噪比与输出信噪比上升的现象。在图8(c)中, 俯仰角为 0.16π 与 0.17π 时, 零模态响应不变, 高模态的峰值响应变大, 导致式(15)中多模态无噪声的回波信号功率 P_r 增大, 累加后的 $\delta_3 \text{ dB}$ 功率随之增大, 而噪声信号与其成像图 δ_{noise} 功率变化较小, 导致了输入、输出信噪比的增大。在Ka波段, UCA半径为 12λ 的情况下, 俯仰角 27° 处的归一化增益不低于 -1.8 dB, 算法能将分布在各个模态的能量利用起来, 系统在所需俯仰角范围上具有较高的稳定性, 有较好的成像性能。

4.3 对比分析

为了定量分析成像性能, 将本文提出的成像方法与先前学者提出的成像方法进行对比分析。单个散射点(300.5 m, 0.12π (rad), 0.19π (rad))的三维剖面图如图10所示, 图10(a)为BP-FFT与BP-FFT(H_p)方法结果对比图, 图10(b)为BP-FFT与BP-RD-FFT方法结果对比图, 图10(c)为FFT与Burg方法结果对比图。特别的, 为区分FFT与Burg两

种方法, 此小节中BP-RD-FFT代指为4.1节提出的BP-RD成像方法。

首先考虑未添加多普勒网格的情况, BP-FFT方法最终的成像图为 $\delta(R_g, \theta_g, \varphi_g) = \sum_{\eta} \text{fft}_{\alpha} \{S_{\text{rcomp}} [2R_{\eta}/c, \alpha, \eta] \cdot H_{\alpha}\}$, BP-FFT(H_p)方法参考了文献[19]提出的一种相位补偿方法:

$$H_p = \begin{cases} -(-j)^{\alpha}, J_{\alpha}(kr_a \sin \theta_{\eta}) < 0 \\ (-j)^{\alpha}, J_{\alpha}(kr_a \sin \theta_{\eta}) > 0 \end{cases}$$

该方法考虑了贝塞尔函数的正负号带来的影响, BP-FFT方法对俯仰维的副瓣电平改善幅度较小, 说明贝塞尔函数幅度补偿对成像性能的提升没有帮助。在添加多普勒网格后, 图10(b)中BP-RD-FFT方法相比于BP-FFT方法在距离以及俯仰维上缩窄了主瓣宽度, 减低了副瓣电平, 说明多普勒网格的添加能够较好地提升成像性能。同时, 可以采用超分辨算法进一步提升成像性能。相比于传统的谱分析方法, 基于AR模型的Burg方法能够降低副瓣电平并得到更高的分辨率^[20], 图10(c)中BP-Burg与BP-RD-Burg分别为改进后的BP-FFT与BP-RD-FFT方法, 可以观察到Burg方法在俯仰维与方位维上较大地改善了成像效果, 其根本原因在于方位维的分辨率取决于模态个数, Burg通过外推实现了方位维的高分辨处理, 但同时超分辨方法会带来额外的计算量, 在实际运用中应该综合考虑成像性能与时效性来选取不同的方法。

在实际应用中, 无论机载平台还是弹载平台, 成像算法都需要适应高速平台与目标相对运动的场景, 除了成像性能上的提升, 本文所提出算法可以有效解决速度估计不准时, 无法正确聚焦成像的问题, 在中心速度200 m/s, 速度偏差绝对值 ≤ 25 m/s的情况下, 对上述5种方法在不同的估计误差下进行仿真, 得到了聚焦偏差随速度估计误差的变化结果, 如图11(a)、图11(b)所示。根据仿真结果, 未添加多普勒网格的方法在较高的估计误差下聚焦结果较差, 俯仰维的最大偏差接近 20° , 方位维的最大偏差接近 90° 。添加了多普勒网格的BP-RD-FFT与BP-RD-Burg方法在俯仰维与方位维的聚焦偏差远远小于其他方法, 俯仰维最大偏差值小于 1° , 在方位维也大大改善了速度估计误差对成像的影响, 验证了所提算法相比其他算法的性能优势。

5 实验与分析

5.1 仿真实验

通过多模态连续等幅扫描波束、脉冲压缩、

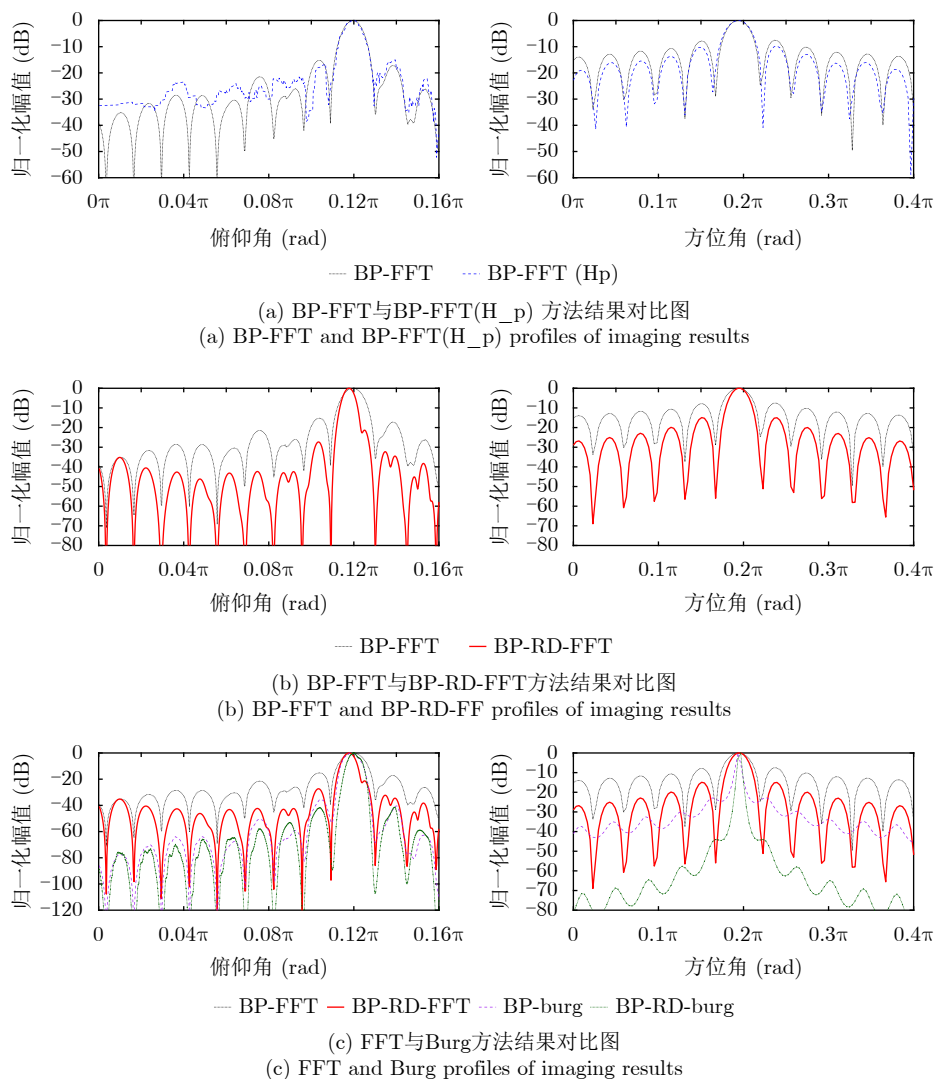


图 10 三维点目标成像结果对比图

Fig. 10 Three-dimensional profiles of the target imaging results

BP-RD成像处理, 对目标进行距离-方位-俯仰三维成像仿真, 仿真参数设置如表2所示。

在如表2所示的参数设置下, 3个维度均有良好的成像分辨率。图12与图13中能清晰地观察到目标1与目标2对焦到正确位置的成像图峰值, 算法有着很好的聚焦效果。并在此基础上对多个点目标进行成像, 设置俯仰角分别为 $[0\pi, 0.04\pi, 0.08\pi, 0.12\pi, 0.15\pi]$ 的5个目标一同成像, 算法对多目标的处理结果如图14所示, 在方位-俯仰剖面图中, 受到多目标的旁瓣影响, 随着俯仰角的增大, 个别目标的峰值响应增加, 但整体上仍呈衰减趋势, 且衰减量小于 -1.5 dB, 验证了信号处理增益的变化。对成像结果平滑处理后提取峰值位置即可得到目标的三维信息。

5.2 实测数据分析

在微波暗室中模拟雷达的成像场景(图15), 飞

机模型位于微波暗室的中央, 放置在白色泡沫支架上, 模型呈水平姿态, 机翼部分稍有倾斜。涡旋波雷达采用UCA体制, 具有16个发射阵元, 单接收阵元位于均匀圆阵中心, 对准了飞机模型的机身部分, 模型整体位于雷达的多模态波束范围之内; 理论上, 在测试体制下的最大不失真俯仰角为 10° , 此时机翼部分位于视场边缘。对飞机的回波数据进行了分析, 具体的环境参数如表3所示。

图16给出了一个周期内的不同模态值的信号脉压结果, 模态值 $\alpha=0$ 时发射阵元的相位调制量为零, 此时发射的信号为线性调频波, 其脉压后回波信号峰值的时延量对应着目标的距离向信息, 与飞机摆放位置相吻合; 贝塞尔函数幅度调制导致了不同模态的信号在距离向上的峰值幅度不同; 飞机在距离向上的跨度决定了不同模态高于背景杂波的主瓣范围。

图17、图18为最终的成像结果。实际测量中,

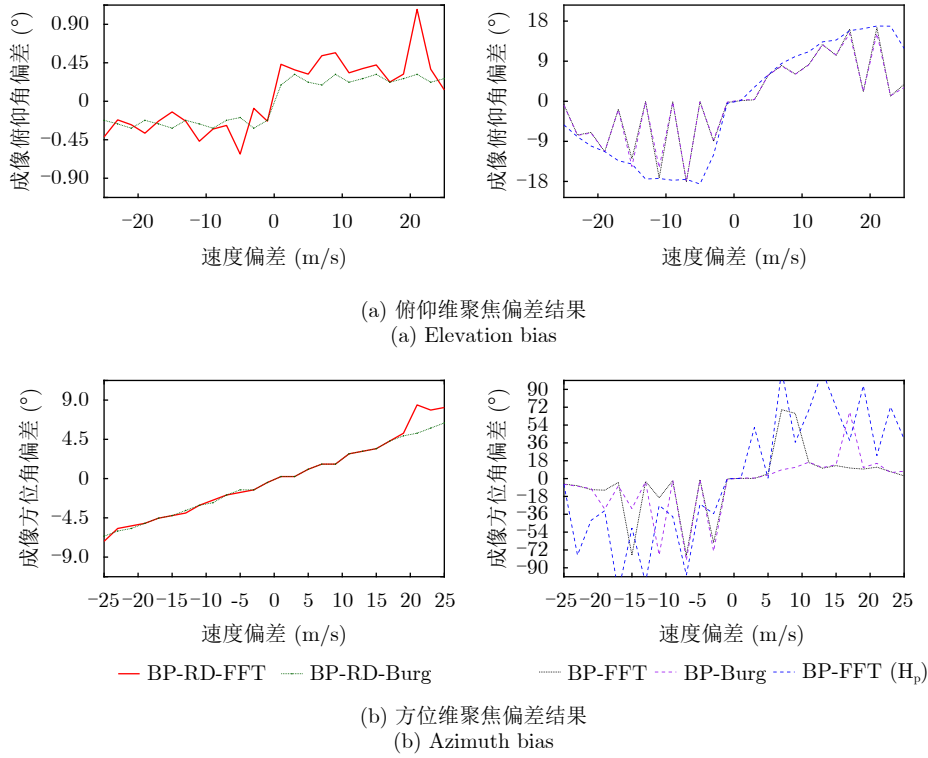


图 11 不同速度偏差-聚焦成像偏差曲线

Fig. 11 Imaging bias with different velocity bias

表 2 仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters

参数	值
目标1的 $R-\theta-\varphi$ 坐标(m, rad, rad)	$(300, 0.10\pi, 0.055\pi)$
目标2的 $R-\theta-\varphi$ 坐标(m, rad, rad)	$(300, 0.15\pi, 0.055\pi)$
雷达UCA阵元数量 N (个)	64
UCA半径 r_a (m)	0.09
信号载频 f_c (GHz)	35
信号脉冲周期 T_p (μ s)	0.54
带宽 B (MHz)	300
OAM范围	$[-30, 30]$

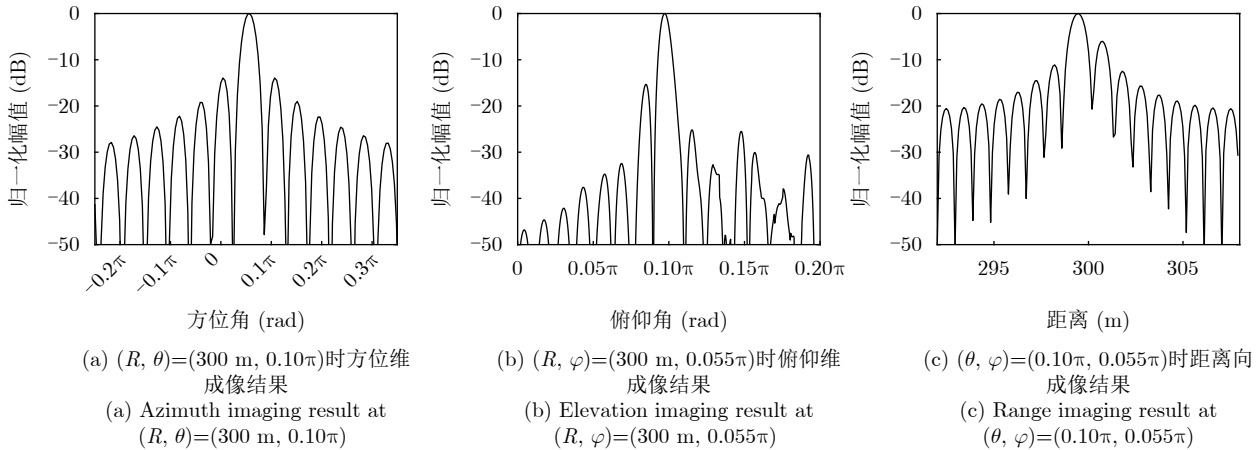


图 12 目标1不同维度的成像结果($\theta = 0.1\pi$)

Fig. 12 Point target 1 imaging results in different dimensions ($\theta = 0.1\pi$)

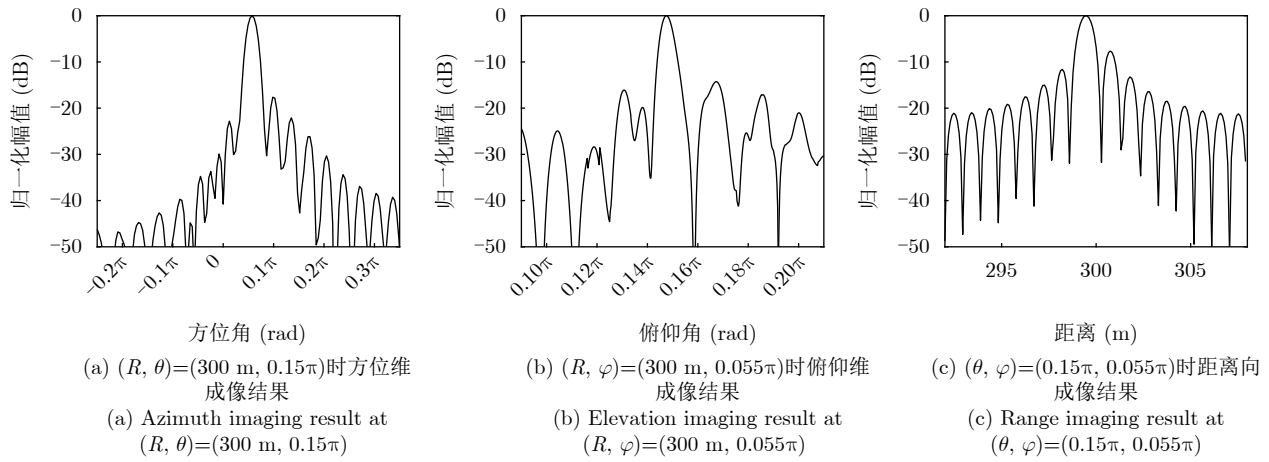


图 13 目标2不同维度的成像结果($\theta = 0.15\pi$)

Fig. 13 Point target2 imaging results in different dimensions ($\theta = 0.15\pi$)

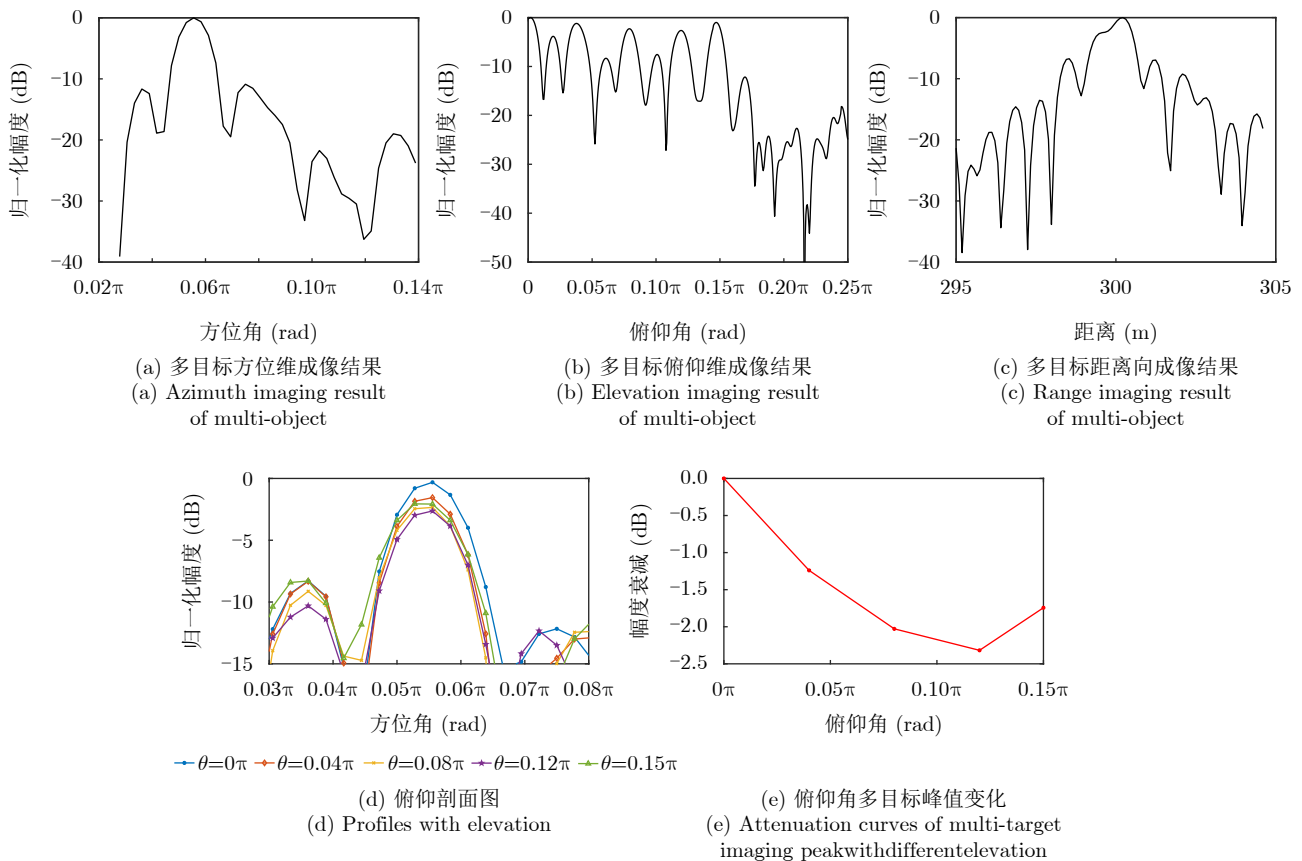


图 14 多目标不同维度的成像结果
 Fig. 14 Multi-object imaging results

受到模型大小与发射阵元数量的限制，在模型跨越距离单元较多的X轴和Z轴上，整体有较好的成像表现，在跨度较小的Y轴上出现了旁瓣增大，成像结果模糊的现象，导致了机身机尾等RCS较小的地方，成像效果较差，飞机头部以及机翼等RCS较强的部分在成像图中呈现较高的主瓣，有较好的成像效果。

6 结语

本文将涡旋电磁波与前视雷达成像相结合，建立了基于均匀圆阵多发单收体制的电磁涡旋前视雷达成像模型，提出了分时多模态扫描的空域成像体制，添加了多普勒网格并在幅度与相位补偿方面改进了BP成像算法，实现了对目标三维位置的准确

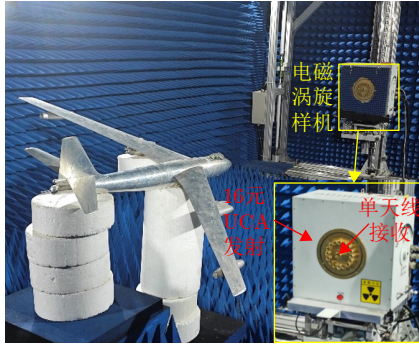


图 15 飞机目标实验场景照片

Fig. 15 The scene of aircraft target experiment

表 3 实测参数

Tab. 3 Experimental parameters

参数	值
飞机模型中心位置(m)	4.5
飞机模型在XYZ上的跨度(m)	(1.5, 0.08, 1.15)
阵元数量 N (个)	16
UCA半径 r_a (m)	0.0615
信号载频 f_c (GHz)	35.025
信号脉冲周期 T_p (μ s)	0.54
带宽 B (MHz)	300
OAM范围	$[-7,7]$

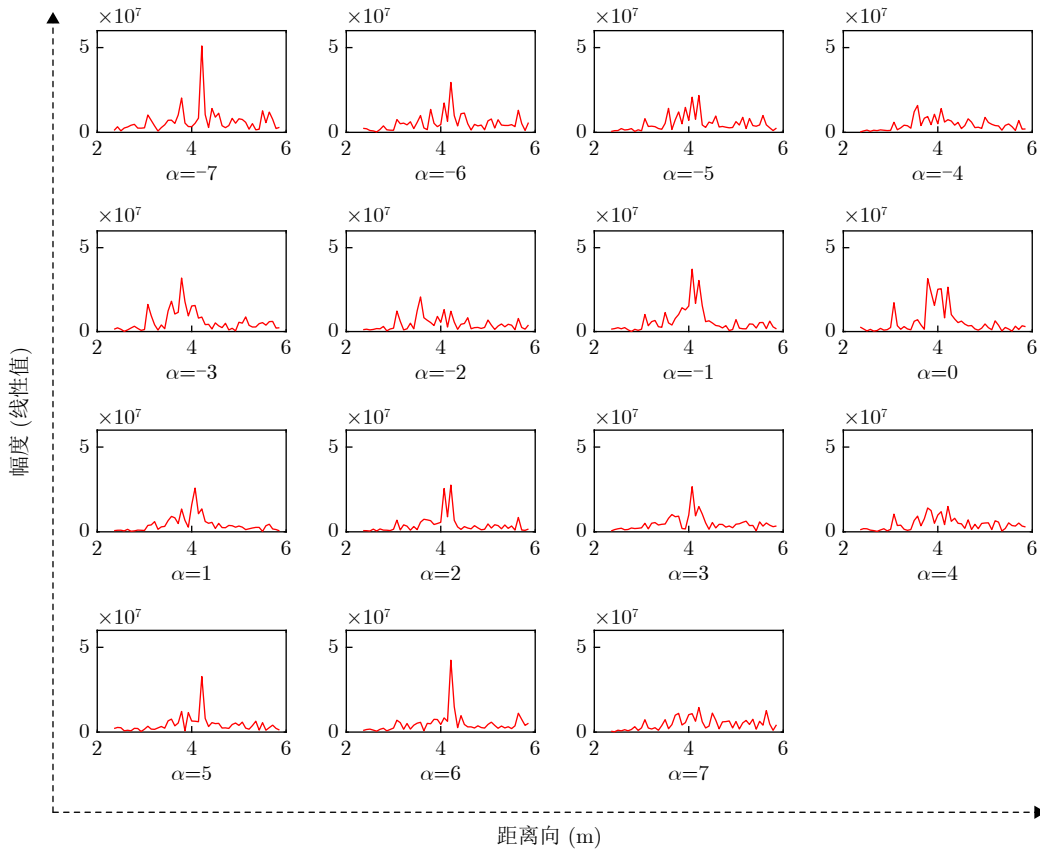


图 16 实测数据在不同模式下的脉压结果

Fig. 16 Pulse pressure results of measured data with different modes

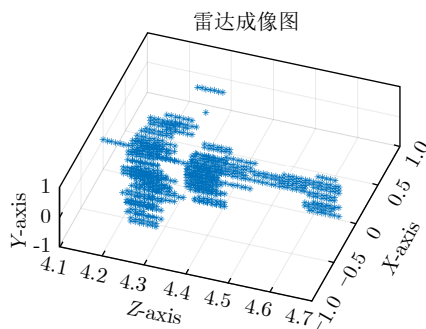


图 17 飞机目标的三维成像图

Fig. 17 Three-dimensional image of the aircraft target

的匹配, 并通过仿真和实测验证了算法的成像性能。所提方法适用于分时多模态扫描、同时多模态收发等不同的电磁涡旋雷达体制。基于点目标成像结果, 验证了在多模态涡旋波覆盖的较大视场范围内, 目标回波的归一化等效增益在低俯仰角与高俯仰角处相当, 在给出的示例中, 视场角覆盖范围为 $\pm 27^\circ$ 时, 最大俯仰角处的等效增益相比 0° 不低于 -1.8 dB。所提算法在飞机目标成像上得到了验证, 成像结果可精确重构复杂目标的三维结构。在后续研究中, 将根据前视雷达的具体应用场景, 利用涡旋电磁波引入的多模态特性, 通过分数阶模态扫描

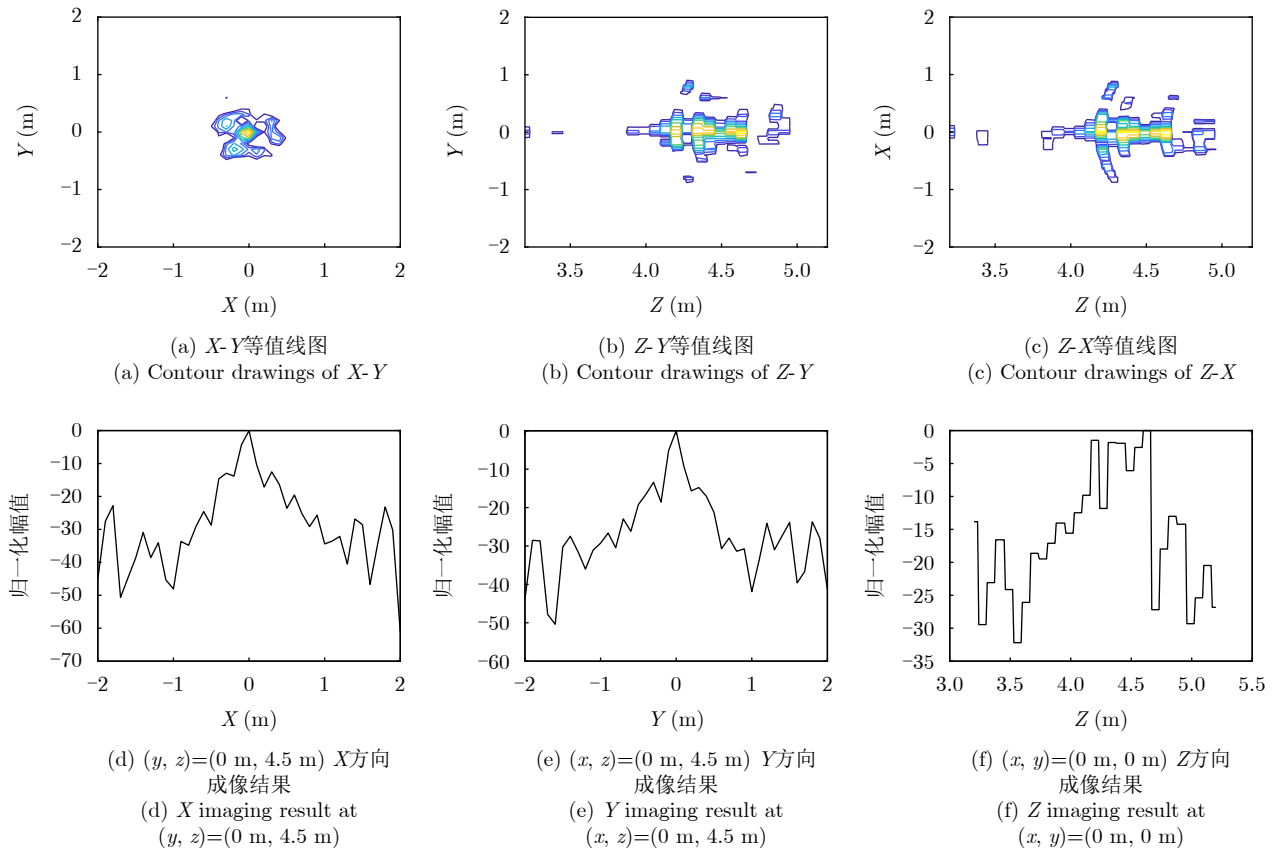


图 18 飞机目标三维成像的二维切面图

Fig. 18 Aircraft target imaging results in different dimensions

方式，从而进一步消除贝塞尔函数对成像性能的影响。

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] SUN Guangcai, XING Mengdao, XIA Xianggen, *et al.* Multichannel full-aperture azimuth processing for beam steering SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(9): 4761–4778. doi: [10.1109/TGRS.2012.2230267](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2230267).
- [2] 宗竹林, 胡剑浩, 朱立东, 等. 编队卫星合成孔径雷达空时二维压缩感知成像[J]. *电波科学学报*, 2012, 27(3): 626–636. ZONG Zhulin, HU Jianhao, ZHU Lidong, *et al.* Formation-flying small satellites SAR imaging algorithm using space-time compressive sensing[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2012, 27(3): 626–636.
- [3] YANIK M E, WANG Dan, and TORLAK M. Development and demonstration of MIMO-SAR mmWave imaging testbeds[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 126019–126038. doi: [10.1109/ACCESS.2020.3007877](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007877).
- [4] 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](https://doi.org/10.1364/AOP.3.000161).
- [5] 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 Applied*, 1992, 45(11): 8185–8189. doi: [10.1103/PhysRevA.45.8185](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.45.8185).
- [6] LIU Kang, LI Xiang, GAO Yue, *et al.* Microwave imaging of spinning object using orbital angular momentum[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(12): 124903. doi: [10.1063/1.4991655](https://doi.org/10.1063/1.4991655).
- [7] 吕坤, 马晖, 刘宏伟. 基于涡旋电磁波体制的三维SAR成像方法[J]. *雷达学报*, 2021, 10(5): 691–698. doi: [10.12000/JR21125](https://doi.org/10.12000/JR21125). LYU Kun, MA Hui, and LIU Hongwei. Three-dimensional imaging using the electromagnetic vortex synthetic aperture radar[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(5): 691–698. doi: [10.12000/JR21125](https://doi.org/10.12000/JR21125).
- [8] GONG Ting, CHENG Yongqiang, LI Xiang, *et al.* Micromotion detection of moving and spinning object based on rotational Doppler shift[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2018, 28(9): 843–845. doi: [10.1109/MWC.2018.2829043](https://doi.org/10.1109/MWC.2018.2829043).

- 1109/LMWC.2018.2858552.
- [9] 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).
- [10] 郭桂蓉, 胡卫东, 杜小勇. 基于电磁涡旋的雷达目标成像[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(6): 71–76. doi: [10.3969/j.issn.1001-2486.2013.06.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2486.2013.06.013).
GUO Guirong, HU Weidong, and DU Xiaoyong. Electromagnetic vortex based radar target imaging[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2013, 35(6): 71–76. doi: [10.3969/j.issn.1001-2486.2013.06.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2486.2013.06.013).
- [11] BU Xiangxi, ZHANG Zhuo, CHEN Longyong, *et al.* Implementation of vortex electromagnetic waves high-resolution synthetic aperture radar imaging[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(5): 764–767. doi: [10.1109/LAWP.2018.2814980](https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2814980).
- [12] JIANG Xuefeng, ZHAO Yufei, and ZHANG Chao. Capacity evaluation on the long-distance orbital angular momentum non-orthogonal transmission[C]. 2018 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), Chengdu, China, 2018: 1–4. doi: [10.1109/IWS.2018.8400839](https://doi.org/10.1109/IWS.2018.8400839).
- [13] FANG Yue, CHEN Jie, WANG Pengbo, *et al.* A novel image formation method for electromagnetic vortex SAR with orbital-angular-momentum[J]. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2019, 82: 129–137. doi: [10.2528/PIERM19011704](https://doi.org/10.2528/PIERM19011704).
- [14] BU Xiangxi, ZHANG Zhuo, CHEN Longyong, *et al.* Synthetic aperture radar interferometry based on vortex electromagnetic waves[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 82693–82700. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2908209](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908209).
- [15] 袁航, 倪嘉成, 荣楠, 等. 基于单频涡旋电磁波雷达的人体目标步态精细识别[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(6): 39–45. doi: [10.3969/j.issn.1009-3516.2020.06.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-3516.2020.06.007).
YUAN Hang, NI Jiacheng, RONG Nan, *et al.* Fine gait recognition of human target with single-frequency vortex electromagnetic wave radar[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2020, 21(6): 39–45. doi: [10.3969/j.issn.1009-3516.2020.06.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-3516.2020.06.007).
- [16] WANG Zhaji, SUN Guanqun, ZHANG Fangzheng, *et al.* Microwave-photonics-based vortex electromagnetic wave generation for high resolution radar imaging[C]. 2022 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), Shenzhen, China, 2022: 1687–1690. doi: [10.1109/ACP.55869.2022.10088880](https://doi.org/10.1109/ACP.55869.2022.10088880).
- [17] 袁铁柱. 涡旋电磁波在雷达成像中的应用研究[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2017.
YUAN Tiezhu. Research on radar imaging using electromagnetic vortex wave[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2017.
- [18] MA Hui and LIU Hongwei. Waveform diversity-based generation of convergent beam carrying orbital angular momentum[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(7): 5487–5495. doi: [10.1109/TAP.2020.2981724](https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2981724).
- [19] LIU Kang, CHENG Yongqiang, GAO Yue, *et al.* Super-resolution radar imaging based on experimental OAM beams[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(16): 164102. doi: [10.1063/1.4981253](https://doi.org/10.1063/1.4981253).
- [20] WANG Jianqiu, LIU Kang, LIU Hongyan, *et al.* 3-D object imaging method with electromagnetic vortex[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 2000512. doi: [10.1109/TGRS.2021.3069914](https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3069914).

作者简介

潘浩然, 博士生, 主要研究方向为涡旋电磁新体制雷达与雷达信号处理。

马 晖, 博士, 副教授, 主要研究方向为雷达成像、新体制雷达、智能雷达、雷达信号处理。

胡敦法, 硕士生, 主要研究方向为电磁涡旋波新体制雷达、雷达成像。

刘宏伟, 博士, 教授, 主要研究方向为雷达目标识别、认知探测、网络化协同探测、雷达智能化。

(责任编辑: 高山流水)