

基于涡旋雷达的飞鸟与旋翼无人机微动参数提取研究

周红平 李睿 李刘林 郭忠义*

(合肥工业大学计算机与信息学院 合肥 230009)

摘要: 针对当前对飞鸟和旋翼无人机(UAVs)识别的迫切需求, 该文提出了一种基于涡旋雷达的目标参数提取方法。工作核心聚焦于目标参数获取, 在建模与参数提取维度上进行了系统扩展。首先分别对飞鸟主体运动与扑翼行为以及旋翼无人机的旋翼转动与机体结构进行了数学建模与分析, 推导了散射点对应的径向多普勒与旋转多普勒频移表达式, 并从雷达回波信号中提取微多普勒特征, 实现目标参数反演。对于鸟类目标, 基于回波信号的频谱峰值提取径向多普勒估计飞行速度, 并结合散射点旋转多普勒频移公式, 通过短时傅里叶变换(STFT)计算旋转多普勒变化, 实现对扑翼长度的估计, 在低信噪比(SNR)条件下, 扑翼长度估计误差保持在0.03 m以内。对于旋翼无人机目标, 首先建立回波信号模型, 推导微多普勒频移中径向与旋转分量的解析关系, 并结合重构的多普勒信息与距离-时间维度, 反演获得欧拉角、旋翼转速、旋翼长度以及机体到旋翼的距离等共6项结构与运动参数, 各参数的估计误差显著低于传统基于单一多普勒的方法, 其参数提取误差均保持在2%以内。仿真结果表明, 该文提出的基于涡旋雷达的鸟类与旋翼无人机参数提取方法能够实现多参数的高精度获取, 并在低信噪比条件下仍保持稳定可靠的性能, 验证了方法的有效性与工程应用潜力。

关键词: 涡旋电磁波; 旋转多普勒频移; 短时傅里叶变换; 旋翼无人机; 时频分析

中图分类号: TN98

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2026)x-0001-16

DOI: 10.12000/JR25164

CSTR: 32380.14.JR25164

引用格式: 周红平, 李睿, 李刘林, 等. 基于涡旋雷达的飞鸟与旋翼无人机微动参数提取研究[J]. 雷达学报(中英文), 待出版. doi: 10.12000/JR25164.

Reference format: ZHOU Hongping, LI Rui, LI Liulin, *et al.* Micromotions parameter extraction of birds and rotary-wing unmanned aerial vehicles based on vortex radar[J]. *Journal of Radars*, in press. doi: 10.12000/JR25164.

Micromotions Parameter Extraction of Birds and Rotary-wing Unmanned Aerial Vehicles Based on Vortex Radar

ZHOU Hongping LI Rui LI Liulin GUO Zhongyi*

(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To address the urgent need to identify birds and rotary-wing Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), this paper proposes a vortex radar-based method for extracting micromotion parameters of targets. The study focused on target parameter acquisition and systematically extended target modeling and parameter extraction strategies. First, mathematical models were developed for the body motion and wing flapping behavior of birds as well as for the rotor movement characteristics and body structure of rotary-wing UAVs. Further, analytical expressions for the radial and rotational Doppler frequency shifts at scattering points were derived, and micro-Doppler features were extracted from radar echo signals to enable target parameter inversion. For bird targets,

收稿日期: 2025-09-01; 改回日期: 2026-01-30; 网络出版: 2026-03-30

*通信作者: 郭忠义 guozhongyi@hfut.edu.cn

*Corresponding Author: GUO Zhongyi, guozhongyi@hfut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61775050)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61775050)

责任主编: 罗迎 Corresponding Editor: LUO Ying

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

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

the radial Doppler frequency was estimated by extracting the spectral peak of the echo signal to obtain the flight velocity. In addition, by combining the rotational Doppler frequency shifts of the scattering points and analyzing the variations of the rotational Doppler frequency using the Short-Time Fourier Transform (STFT), the wing-flapping length was estimated. Even under low Signal-to-Noise Ratio (SNR) conditions, the estimation error of the wing-flapping length remained within 0.03 m. For rotary-wing UAV targets, an echo signal model was first constructed, and the analytical relationship between the radial and rotational components of the micro-Doppler frequency shift was derived. Using the reconstructed Doppler information and through range-time domain analysis, six structural and motion parameters were retrieved, including the Euler angles rotor rotational speed, rotor length, and the distance between the UAV body and rotor. The estimation errors for all parameters were significantly lower than those obtained with conventional approaches based on individual Doppler features, with all parameters remaining within 2%. Simulation results demonstrated that the proposed vortex radar-based parameter extraction method enables accurate multiparameter estimation for birds and rotary-wing UAVs. The method also exhibits stable and reliable performance under low SNR conditions, confirming its effectiveness and applicability in practical engineering scenarios.

Key words: Vortex electromagnetic wave; Rotational Doppler frequency; Short-Time Fourier Transform (STFT); Rotary-wing UAVs; Time-frequency analysis

1 引言

鸟击是指航空器在起降或飞行过程中与鸟类发生碰撞所导致的事故。如何有效预防鸟击事件,一直是全球航空安全领域面临的重要课题。近年来,随着机场航班数量的持续增长以及周边生态环境的改善,机场面临的鸟击防范压力日益加剧,对防控手段提出了更高的要求。同时,随着以旋翼无人机为代表的“低慢小”低空飞行器的迅速发展,利用无人机从事非法活动的事件日益增多,已对重点区域防护、城市公共安全以及空中航路管控带来严峻挑战。目前对于鸟类目标和旋翼无人机目标的监视,雷达探测仍然是最常见且应用广泛的一种手段,然而在实际的应用中,传统雷达类型在识别鸟类目标与无人机目标时经常面临检测概率低、分类识别能力弱等问题。为了提升目标识别的准确性,微多普勒分析逐渐成为研究热点。微多普勒频率作为传统多普勒频率的拓展,反映了目标在整体运动基础上的局部或周期性运动,如鸟类翅膀扑动或无人机旋翼转动。鸟类目标和无人机目标均属于非刚体,因其具有局部结构的周期性运动,会在主体平动所产生的雷达多普勒信号附近叠加额外的调制频带,这种调制信号被称为微多普勒信号。

针对旋翼无人机的微多普勒探测研究,文献[1-3]通过对多种型号无人机的实验分析,验证了微多普勒特征可作为传统多普勒信息的重要补充,在目标识别中发挥辅助作用,但相关研究未深入探讨多普勒参数的具体提取方法与工程实现细节,难以直接支撑实际探测系统的应用。文献[4,5]构建了无人机微多普勒回波模型并分析了信号特性,却未进一步

量化旋翼数量、叶片长度及转速等关键结构参数对微多普勒效应的调制机制,导致模型与实际目标的适配性不足。文献[6]虽探讨了旋翼数目、叶片尺寸及转动频率对微多普勒特性的影响,但采用倒频谱方法估计旋翼数量与转速时,对脉冲回波的数量要求较高,不仅计算效率偏低,且在低数据量场景下识别精度受限。值得注意的是,无人机飞行过程中的欧拉角是区分目标类型、判断飞行意图的关键参数,但现有基于多普勒频率的探测方法,尚未实现对该姿态参数的有效提取,导致目标识别维度不完整,难以满足高精度探测需求。当前鸟类目标微多普勒探测研究中,主流做法是将翅膀简化为上臂-前臂-手部的三连杆模型以适配运动学建模需求。其中,文献[7-9]通过实验验证了微多普勒特征在扑翼目标探测中的有效性,成功实现了扑翼频率的精准估计,但未深入探讨扑翼长度、扭转角度等关键结构与姿态参数的提取方法;文献[10]基于三连杆模型构建了完整的鸟类目标微多普勒回波模型,通过理论推导明确了微多普勒频率与扑翼运动的关联机制,并借助回波信号自相关函数实现了扑翼长度的估算,不过该方法未考虑翅膀扭转运动对微多普勒调制的影响,且在低信噪比场景下的参数估计鲁棒性有待提升。

然而,传统雷达探测中的信息调制方法主要在时域、频域、极化域中进行[11-14],根据目标与雷达的相对运行来进行径向多普勒的探测,利用微多普勒频率来实现运动目标的参数提取,但是当目标可以实现悬停或者是当雷达和目标之间保持相对运动的时候,传统雷达的多普勒检测方法就存在一定的限制。因此,为了弥补传统雷达的多普勒检测方法

的限制, 涡旋电磁波的引入为高精度运动目标的特征提取提供了新的思路^[15-18]。携带有轨道角动量的涡旋电磁波相位波前呈现出螺旋状, 当涡旋电磁波和目标发生散射交互时, 会引入与目标自旋密切相关的频率偏移, 从而产生旋转多普勒效应, 该效应描述了目标绕某个固定轴旋转所引起的频率偏移, 其调制幅度与目标角速度、散射位置及轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)相关^[19-22]。目前, 基于涡旋电磁波的目标参数提取主要存在两类核心实现方法: 第1类是利用OAM模式 $l=0$ 发射传统电磁波以获取目标径向多普勒频移, 再通过 $l \neq 0$ 的OAM模式信号减去总多普勒频移, 实现旋转多普勒分量的分离提取, 文献^[23]已基于该方法完成任意位置旋转物体的微动参数估计; 第2类是通过 $+l$ 与 $-l$ 两个相反OAM模式回波信号的共轭相乘, 直接消除径向多普勒频移并保留旋转多普勒信息, 但该方法仅适用于单散射点目标, 面对多散射点目标时无法实现有效多普勒分离, 存在显著局限性。

在此基础上, 文献^[24]进一步针对圆锥目标进动轴与雷达视线(Line of Sight, LOS)同轴的特定场景开展了微动参数估计研究, 拓展了涡旋电磁波雷达在旋转目标探测领域的应用边界。然而, 该研究仍主要聚焦于运动参数提取, 未解决目标结构参数的有效获取问题。为此, 文献^[25]提出了一种基于涡旋波与调频波融合的弹道目标参数估计方法, 通过联合利用径向多普勒与旋转多普勒信息, 实现了运动参数与结构参数的同步估计。尽管如此, 现有基于涡旋电磁波的目标参数提取技术多面向锥形体等规则结构, 对于飞鸟、旋翼无人机等“低慢小”非刚性目标的适配性仍显不足。综上, 将涡旋电磁波携带的轨道角动量特性与旋转多普勒效应用于无人机旋翼和鸟类翅膀等非规则旋转目标, 不仅能够实现其微多普勒特征的有效提取, 也为旋转目标的建模、参数估计与分类识别提供了新的技术路径与研究空间。

本文首先建立了飞鸟翅膀扑动以及旋翼无人机在旋转状态下的运动模型, 并在此基础之上, 利用涡旋电磁波对目标进行照射, 通过对其反射回波中所包含的径向和旋转多普勒频移信息进行分析, 进而提取目标的多种参数信息, 从而实现了对飞鸟与无人机的识别。

2 飞鸟与旋翼无人机的微动建模

2.1 旋转多普勒探测模型

涡旋雷达系统通常采用的是均匀圆形阵列(Uniform Circular Array, UCA)雷达^[26-28], 采用

多输入多输出法产生涡旋电磁波, 具体架构如图1所示。

UCA雷达的每个阵元发射一个载频为 f_0 的单频信号, 由UCA雷达合成的传输信号可表示为

$$S(t) = N j^l e^{j2\pi f_0 t} e^{j l \varphi(t)} J_l(k a \sin \theta) \quad (1)$$

其中, l 为OAM模式数, $J_l(\cdot)$ 为第1类贝塞尔函数, a 为UCA的半径, N 为UCA的天线个数, θ 和 φ 分别为目标的俯仰角和方位角, k 为波数。经过基带变换处理后, 回波信号可以改写为

$$\begin{aligned} S_{rp}(t, l) &= \sigma j^{2l} N^2 e^{j2\pi f_0 \tau} e^{j2l\varphi(t)} J_l^2(k a \sin \theta) \\ &= A e^{j2kR(t)} e^{j2l\varphi(t)} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, σ 为散射系数, $\tau = 2R(t)/c$ 为时延, R 为雷达与目标之间的距离, c 为真空中的光速, $A = \sigma j^{2l} N \cdot J_l^2(k a \sin \theta)$ 是信号的振幅。假设有 M 个散射中心, 根据式(2), OAM模式数为 l 的UCA雷达的回波信号表示为

$$\begin{aligned} S_r^{\text{total}}(t, l) &= \sum_{i=1}^M S_{rp}^i(t, l) + \mathbf{n}(t) \\ &= \sum_{i=1}^M A_i e^{j2kR_i(t)} e^{j2l\varphi_i(t)} + \mathbf{n}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, A_i , $R_i(t)$ 和 $\varphi_i(t)$ 分别表示第 i 个散射点的信号振幅、目标的距离和方位角, $\mathbf{n}(t)$ 指高斯白噪声。 $\Phi_i(t) = 2kR_i(t) + 2l\varphi_i(t)$ 为UCA雷达接收信号中的相位项。接收信号的微多普勒频移 f_D 可以表示为

$$\begin{aligned} f_D &= \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \Phi_i(t)}{\partial t} = \frac{2}{\lambda} \frac{\partial R_i(t)}{\partial t} + \frac{l}{\pi} \frac{\partial \varphi_i(t)}{\partial t} \\ &= f_{D-r} + f_{D-a} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, λ 是波长, f_{D-r} 和 f_{D-a} 分别表示信号的径向多普勒频移和旋转多普勒频移。由式(4)可知, 目标的径向多普勒和目标的距离有关, 旋转多普勒和目标的

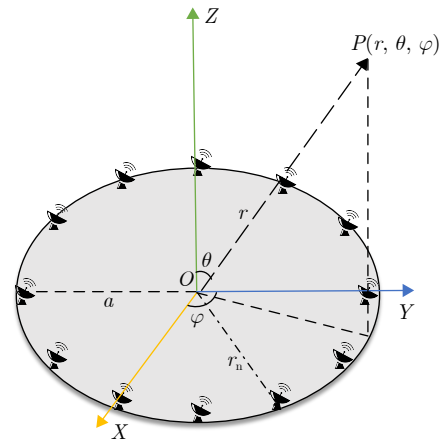


图 1 涡旋雷达探测原理图

Fig. 1 Schematic diagram of vortex radar detection principle

方位角信息以及OAM模式有关,因此当发送正负OAM模式的时候,回波信号的多普勒频率为

$$\left. \begin{aligned} f_{+l} &= \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \Phi_i(t)}{\partial t} = \frac{2}{\lambda} \frac{\partial R_i(t)}{\partial t} + \frac{l}{\pi} \frac{\partial \varphi_i(t)}{\partial t} \\ &= f_{D-r} + f_{D-a} \\ f_{-l} &= \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \Phi_i(t)}{\partial t} = \frac{2}{\lambda} \frac{\partial R_i(t)}{\partial t} - \frac{l}{\pi} \frac{\partial \varphi_i(t)}{\partial t} \\ &= f_{D-r} - f_{D-a} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

对式(5)进行减法操作,此时 $2f_{D-a}=f_{+l}-f_{-l}$,因此当对两个回波信号采用STFT进行时频分析的时候,多普勒频率差值的一半即为旋转多普勒频率,然后将旋转多普勒频率代入式(5)中的任意一个公式即可求出目标的径向多普勒频率信息。此时即可以实现径向多普勒和旋转多普勒的分离。

2.2 飞鸟微多普勒特征建模

若将飞鸟的扑翼结构类比于人体上肢,其翅膀可划分为上臂、前臂和手部3部分。图2给出了简化后的鸟类翅膀前视图与顶视图。

由图2可知,翅膀的上臂、前臂与手部通过肘关节和腕关节相互连接。扑打角和扭转角被视为随

$$\mathbf{Q}_j(t) = \begin{bmatrix} x_2(t) \\ y_2(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[y_2(t) - y_1(t)] \tan[\varphi_2(t) / \cos(\psi_1(t) - \psi_2(t))] \\ h_1 \cos[\psi_1(t)] + h_2 \cos[\varphi_2(t)] \cdot \cos(\psi_1(t) - \psi_2(t)) \\ z_1(t) + [y_2(t) - y_1(t)] \tan[\psi_1(t) - \psi_2(t)] \end{bmatrix} \quad (10)$$

综上所述,可以通过借用鸟类翅膀的简化运动模型,便可以推导出鸟类目标的雷达回波信号。

为了便于分析,假设飞鸟的翅膀在运动的过程中不会产生弯曲,进而创建了如图3所示的飞鸟运动的空间坐标系。

具体的,以均匀圆形阵列中心为坐标原点 O 建

时间变化的周期性变量,通常采用正弦或余弦函数建模,从而建立简化的翅膀扑动运动模型。在此基础上,可以进一步构造飞鸟扑翼的运动学简化模型,此时上臂的扑打角可表示为

$$\psi_1(t) = A_1 \cos(2\pi f_{\text{flap}} t) + \psi_{10} \quad (6)$$

其中, A_1 表示的是上臂扑打的幅值, f_{flap} 表示的是鸟翅膀的扑翼频率, ψ_{10} 为上臂拍打滞后的角度。

前臂的拍打角度为

$$\psi_2(t) = A_2 \cos(2\pi f_{\text{flap}} t) + \psi_{20} \quad (7)$$

其中, A_2 表示的是前臂扑打的幅值, ψ_{20} 为上臂拍打滞后的角度。此时前臂的扭转角可以表示为

$$\varphi_2(t) = C_2 \cos(2\pi f_{\text{flap}} t) + \varphi_{20} \quad (8)$$

其中, C_2 为前臂的扫角幅度, φ_{20} 为扭转滞后的角度。进而可以确定翅膀肘关节的位置所在:

$$\mathbf{Q}_i(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ y_1(t) \\ z_1(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ h_1 \cos[\psi_1(t)] \\ y_1(t) \tan[\psi_1(t)] \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, h_1 表示的是翅膀上臂的长度,同理腕关节所处的位置为

立坐标系 (X, Y, Z) ,以鸟类目标中心点 O' 为坐标原点建立起鸟类目标的翅膀坐标系 (x, y, z) ,其中 y 轴方向表示鸟飞行的方向,雷达坐标系和鸟类目标翅膀的坐标系平行,雷达 O 到 O' 的距离为 R_0 ,方位角和俯仰角可以表示为 φ, θ 。当鸟类目标以扑翼频率 f_{brid} 沿着 y 轴正半轴飞行时,此时目标上任意一

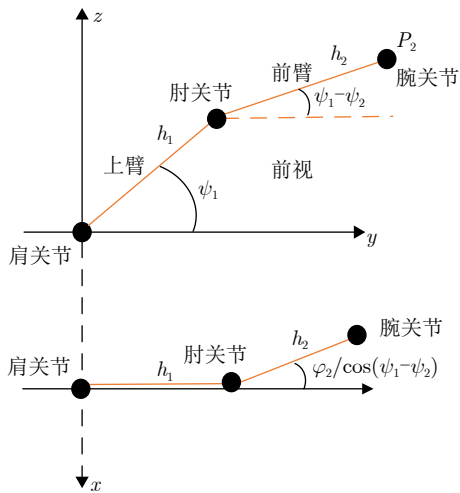


图2 鸟类扑翼的运动学简化模型

Fig. 2 Simplified kinematic model of bird wing flapping

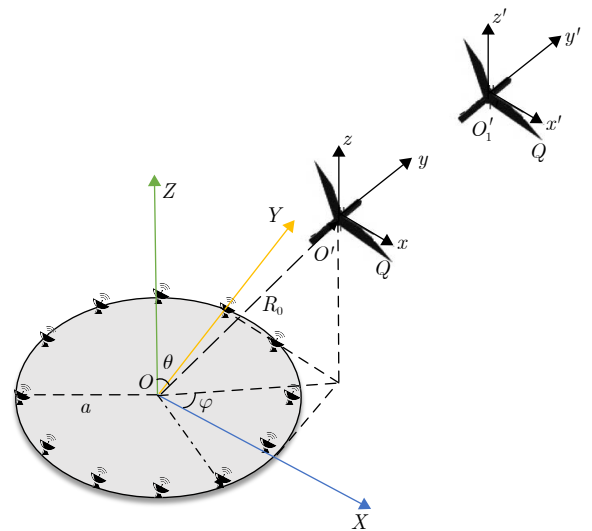


图3 飞鸟运动的空间坐标系

Fig. 3 Spatial coordinate system for bird motion

点的运动都可以认为鸟类主体的径向运动和翅膀扑翼旋转运动两种运动的合成。若鸟类目标的飞行速度为 v ，扑翼张开角度 ψ 为随时间变化的函数，即

$$\psi(t) = \psi_{\max} \sin(2\pi f_{\text{bird}}t + \varphi_0) \quad (11)$$

其中， ψ_{\max} 为扑翼张开角度的最大值， φ_0 表示的是初始时刻鸟类目标扑翼角度相位信息。

假设鸟类目标任一侧的翅膀上最远的散射点 Q 到鸟类坐标原点中心 O' 的距离为 l_{bird} ，经过时间 t 后，点 Q 到雷达 O 的距离 $R(t)$ 可以表示为

$$\begin{aligned} R(t) &= |R_0 + O'O'_1 + O'_1Q| \\ &= \left\{ (R_0 \sin \theta \cos \varphi + l_{\text{bird}} \cos[\psi(t)])^2 \right. \\ &\quad \left. + (R_0 \sin \theta \sin \varphi + vt)^2 \right. \\ &\quad \left. + (R_0 \cos \theta + l_{\text{bird}} \sin[\psi(t)])^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (12) \end{aligned}$$

由于雷达的观察时间较短，因此，目标在观测时间内的飞行距离以及散射点到鸟类目标远远小于目标到雷达坐标原点的距离 R_0 ，因此，可以认为目标在观测期间的整体运动对传播路径的影响相对有限，从而对瞬时距离函数 $R(t)$ 进行近似处理，即 $R_0 \gg vt, R_0 \gg l$ ，因此，式(12)可以表示为

$$\begin{aligned} R(t) &\approx R_0 + vt \sin \varphi \sin \theta + l_{\text{bird}} \cos \varphi \sin \theta \cos[\psi(t)] \\ &\quad + l_{\text{bird}} \cos \theta \sin[\psi(t)] \quad (13) \end{aligned}$$

由式(13)可以得出，当目标位于左翅膀时，其 x, y 坐标可以表示为

$$\left. \begin{aligned} rx_{\text{left_wing}}(t) &= R_0 \cos \varphi \sin \theta - l_{\text{bird}} \cos \psi(t) \\ ry_{\text{left_wing}}(t) &= R_0 \sin \theta \cos \varphi + vt \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

此时目标的方位角可以表示为

$$\phi_{\text{left_wing}}(t) = \arctan \left(\frac{ry_{\text{left_wing}}(t)}{rx_{\text{left_wing}}(t)} \right) \quad (15)$$

由式(5)可以对方位角求偏导数即可得到目标平动多普勒频移中的旋转多普勒频移，因此 Q 点处的旋转多普勒可以表示为

$$f_{D-a} \approx \frac{l'v \cos \varphi}{\pi R_0 \sin \theta} + \frac{l' f_{\text{bird}} l_{\text{bird}} \sin \varphi \cdot \sin(4\pi f_{\text{bird}}t)}{R_0 \sin \theta} \quad (16)$$

其中， l' 表示的是 OAM 模式大小。由式(16)可以看出，目标的旋转多普勒中包含有慢速度直线运动项，同时也包含微多普勒调制项，并且目标的旋转多普勒和目标扑翼的频率、运动的速度以及扑翼的长度有关。

对于目标扑翼的频率可以通过对整体回波信号做自相关处理得出。由式(13)可知，在回波信号中，由鸟身平动所产生的径向多普勒频移在频谱中的幅度最大，能量最集中，可以表示为

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \sin \theta \sin \varphi \quad (17)$$

因此我们可以对回波信号做频谱分析，提取回波频谱峰值所对应的平动多普勒中的径向多普勒频率，进而计算出目标的运动速度 v 。对于鸟类目标的扑翼的长度，首先采用 STFT 方法对回波信号采用进行时频分析^[29,30]，根据式(4)得到目标的平动多普勒频率所包含的旋转多普勒频率，再结合式(16)计算出目标的扑翼长度。因此基于涡旋电磁波的鸟类目标参数的提取方法的步骤如下。

步骤1 首先对回波信号进行频谱分析，提取回波平动多普勒频移中径向多普勒频谱峰值所对应的多普勒频率，得到目标的运动速度 v 。

步骤2 对回波信号进行自相关处理计算出目标的扑翼频率 f_{bird} 。

步骤3 对回波信号进行 STFT 处理，并结合式(4)计算出目标的旋转多普勒。

步骤4 结合式(16)以及步骤1、步骤2中得到的 v 和 f_{bird} 计算出目标的扑翼长度 l_{bird} 。

2.3 旋翼无人机的微多普勒特征建模

旋翼无人机的回波信号主要包含无人机机体所产生的平动多普勒频移以及无人机旋翼转动所产生的微多普勒频率的叠加。雷达与旋翼无人机的坐标关系如图4所示，设 $O-XYZ$ 为雷达坐标系， $o-xyz$ 为旋翼无人机的参考坐标系， $o-x'y'z'$ 为旋翼无人机机体的坐标系，雷达坐标系和旋翼无人机的参考坐标系平行，旋翼无人机的参考坐标系可以和机体自身的坐标系通过式(19)相互转化。雷达坐标和旋翼无人机的几何关系如图4所示，其中 α_c, β_c 表示的是目标的方位角和俯仰角。

当 P_1 点目标位于旋翼无人机上的坐标系时， P_1 点目标的三维坐标表示为

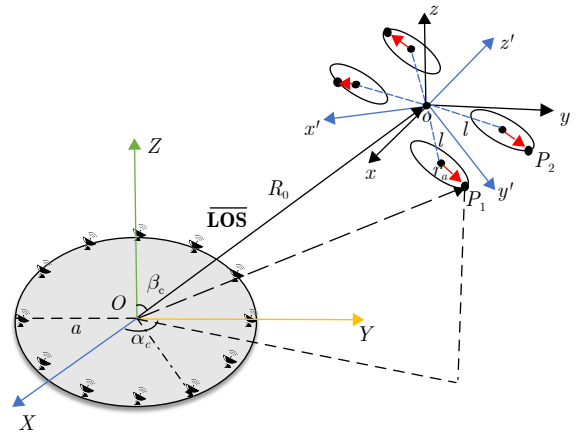


图4 雷达和目标的几何关系

Fig. 4 Geometric relationship between radar and target

$$\begin{bmatrix} x_{P_1}(t) \\ y_{P_1}(t) \\ z_{P_1}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a \cos(2\pi ft + \varphi_1) + l \\ r_a \sin(2\pi ft + \varphi_1) + l \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中, r_a 表示的是旋翼无人机的半径, l 表示的是旋翼无人机旋翼到无人机质心的距离。 $\cos \beta(t)$ 表示的是旋翼和 $\overline{\text{LOS}}$ 之间夹角余弦值。

然后将旋翼无人机的坐标分量转为UCA雷达坐标系下的坐标分量,对于旋翼无人机来说,其坐标转换公式可以表示为

$$\begin{bmatrix} X_{P_1}(t) \\ Y_{P_1}(t) \\ Z_{P_1}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{\text{init}} \begin{bmatrix} x_{P_1}(t) \\ y_{P_1}(t) \\ z_{P_1}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中, \mathbf{R}_{init} 可以表示为

$$\mathbf{R}_{\text{init}} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中,

$$\begin{cases} a_{11} = \cos \psi \cos \theta \\ a_{12} = \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi \\ a_{13} = \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi \\ a_{21} = \sin \psi \cos \theta \\ a_{22} = \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi \\ a_{23} = \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi \\ a_{31} = -\sin \theta \\ a_{32} = \cos \theta \sin \phi \\ a_{33} = \cos \theta \cos \phi \end{cases} \quad (21)$$

其中, (ψ, θ, ϕ) 表示的是旋翼无人机旋转欧拉角,经过式(19)—式(21)变换之后,旋翼无人机上的 P_1 点在UCA雷达坐标系下可以表示为

$$\begin{cases} X_{P_1}(t) = r_a W_1 \sin(2\pi ft + \varphi_1 + w_1) \\ \quad + l(a_{11} + a_{12}) + x_0 \\ Y_{P_1}(t) = r_a W_2 \sin(2\pi ft + \varphi_1 + w_2) \\ \quad + l(a_{21} + a_{22}) + y_0 \\ Z_{P_1}(t) = r_a W_3 \sin(2\pi ft + \varphi_1 + w_3) \\ \quad + l(a_{31} + a_{32}) + z_0 \end{cases} \quad (22)$$

其中,

$$\begin{cases} w_1 = \arctan(a_{11}/a_{12}) \\ w_2 = \arctan(a_{21}/a_{22}) \\ w_3 = \arctan(a_{31}/a_{32}) \\ W_1 = \sqrt{a_{11}^2 + a_{12}^2} \\ W_2 = \sqrt{a_{21}^2 + a_{22}^2} \\ W_3 = \sqrt{a_{31}^2 + a_{32}^2} \end{cases} \quad (23)$$

此时 P_2 点在UCA雷达坐标系下可以表示为

$$\begin{cases} X_{P_2}(t) = r_a W_1 \sin(2\pi ft + \varphi_1 + w_1) \\ \quad + l(-a_{11} + a_{12}) + x_0 \\ Y_{P_2}(t) = r_a W_2 \sin(2\pi ft + \varphi_1 + w_2) \\ \quad + l(-a_{21} + a_{22}) + y_0 \\ Z_{P_2}(t) = r_a W_3 \sin(2\pi ft + \varphi_1 + w_3) \\ \quad + l(-a_{31} + a_{32}) + z_0 \end{cases} \quad (24)$$

因此雷达视距 $\overline{\text{LOS}}$ 下的旋翼无人机上面的目标点的距离可以表示为

$$R_i(t) = \vec{r}_i(t) \cdot \vec{n}_{\text{LOS}} + R_0 \quad (25)$$

其中, R_0 表示的是旋翼无人机的质心到UCA坐标原点 O 的距离, \vec{n}_{LOS} 表示的是雷达视距的单位,因此雷达和目标点之间的距离可以表示为

$$R(t) = R_0 + \sqrt{l^2 + r_a^2 - 2r_a l \cos(2\pi ft + \phi_1)} \cos \beta(t) \quad (26)$$

$$\cos \beta(t) = \overline{\text{LOS}} \frac{\overline{\text{OP}}}{|\overline{\text{OP}}|} \quad (27)$$

其中, $\overline{\text{LOS}} = [\cos \alpha_c \sin \beta_c, \sin \alpha_c \sin \beta_c, \cos \beta_c]$, $\overline{\text{OP}}$ 表示的是旋翼无人机质心到目标点的向量。

此时雷达 $\overline{\text{LOS}}$ 在无人机自身坐标系中可以表示为

$$\begin{aligned} \overline{\text{LOS}} &= \begin{pmatrix} \sin \beta_c \cos(\alpha_c - \psi) \cos \theta + a_{13} \cos \beta_c \\ -\sin \beta_c \sin(\alpha_c - \psi) \cos \theta + a_{23} \cos \beta_c \\ -\sin \beta_c \sin \theta \cos \alpha_c + a_{33} \cos \beta_c \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos \varphi_{\text{LOS}} \sin \theta_{\text{LOS}} \\ \sin \varphi_{\text{LOS}} \sin \theta_{\text{LOS}} \\ \cos \theta_{\text{LOS}} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{LOS}} &= \arctan 2 \left(\frac{-\sin \beta_c \sin(\alpha_c - \psi) \cos \theta + a_{23} \cos \beta_c}{\sin \beta_c \cos(\alpha_c - \psi) \cos \theta + a_{13} \cos \beta_c} \right) \\ \theta_{\text{LOS}} &= \arccos(-\sin \beta_c \sin \theta \cos \alpha_c + \cos \beta_c \cos \theta \cos \phi) \end{aligned} \quad (29)$$

由式(19)—式(21)、式(27)、式(28)可以计算旋翼无人机上一点到UCA坐标原点的距离 $R(t)$,表示为

$$R(t) = R_0 + r_a \sin \theta_{\text{LOS}} \cos(2\pi ft + \varphi_1 - \varphi_{\text{LOS}}) \quad (30)$$

对 $R(t)$ 关于时间 t 求导之后,回波信号的旋转多普勒频移中的径向多普勒可表示为

$$f_{\text{D-r}}(t) = \frac{2}{\lambda} \frac{d(R(t))}{dt} = -\frac{4\pi f r_a}{\lambda} \sin \theta_{\text{LOS}} \cdot \sin(2\pi ft + \varphi_1 - \varphi_{\text{LOS}}) \quad (31)$$

此时 P_1 点的方位角可以表示为

$$\varphi_A(t) = \arctan(Y_{P_1}(t)/X_{P_1}(t)) \quad (32)$$

由于质心坐标 x_0, y_0, z_0 远大于旋翼运动的幅度,

因此可以近似表示为 $x_w(t) = x_0 + \delta x(t)$, $y_w(t) = y_0 + \delta y(t)$, 此时回波信号的微多普勒频移中包含的旋转多普勒可以近似表示为

$$f_{D-a}(t) \approx \frac{L2\pi f r_a}{\pi(D_0^2 + N_0^2)} \sqrt{A^2 + B^2} \sin(\vartheta - \beta) \quad (33)$$

其中,

$$\begin{cases} D_0 = x_0 + l(a_{11} + a_{12}) \\ N_0 = y_0 + l(a_{21} + a_{22}) \\ C_1 = D_0 R_N, C_2 = N_0 R_D \\ A = C_1 \cos \psi_N - C_2 \cos \psi_D \\ B = C_1 \sin \psi_N - C_2 \sin \psi_D \\ \beta = \arctan 2(B, A) \\ R_N = \sqrt{a_{21}^2 + a_{22}^2}, \psi_N = \arctan 2(a_{22}, a_{21}) \\ R_D = \sqrt{a_{11}^2 + a_{12}^2}, \psi_D = \arctan 2(a_{12}, a_{11}) \\ \vartheta = 2\pi f t + \varphi \end{cases} \quad (34)$$

由式(22)和式(24)可以看出, P_1 和 P_2 的距离随时间维度信息做周期性变化, 此时 P_1 和 P_2 的最小值可以表示为

$$\begin{cases} X_{P1 \min} = l(a_{11} + a_{12}) + x_0 \\ Y_{P1 \min} = l(a_{21} + a_{22}) + y_0 \\ Z_{P1 \min} = l(a_{31} + a_{32}) + z_0 \\ X_{P2 \min} = l(-a_{11} + a_{12}) + x_0 \\ Y_{P2 \min} = l(-a_{21} + a_{22}) + y_0 \\ Z_{P2 \min} = l(-a_{31} + a_{32}) + z_0 \end{cases} \quad (35)$$

通过回波信号的最小值, 可以计算出目标的 ψ 和 θ 。

$$\begin{cases} \psi = \arctan \left(\frac{Y_{P1 \min} - Y_{P2 \min}}{X_{P1 \min} - X_{P2 \min}} \right) \\ \theta = \arctan \left\{ \frac{\cos \psi (Z_{P1 \min} - Z_{P2 \min})}{X_{P1 \min} - X_{P2 \min}} \right\} \end{cases} \quad (36)$$

对式(31)进行分析, 此时旋转多普勒频移所包含的径向多普勒的最大值可以表示为: $4\pi f r_a / (\lambda \sin \theta_{LOS})$, 相应的时间可以表示为

$$t = \frac{1}{2\pi f} \left(\frac{\pi}{2} - (\varphi_1 - \varphi_{LOS}) + 2\pi k \right), k \in Z \quad (37)$$

因此, 可采用STFT对回波信号进行时频分析, 提取微多普勒所包含的径向多普勒频率峰值及其对应时刻。利用该时刻信息计算出对应的 φ_{LOS} , 再结合 φ_{LOS} 与式(31)求得 ϕ , 进而通过 θ 和 ϕ 进一步计算 θ_{LOS} 。同时, 对回波信号进行自相关函数处理, 得出旋翼旋转频率 f , 根据STFT提取的最大值计算 r_a 。并由式(33)和式(34)计算出旋翼无人机机体到旋翼的长度 l 。

由于后续对于 ψ 和 θ 的估算依赖于前文中获得

的 l, f 等参数, 为避免前序参数估计误差对后续结果产生累积影响, 有必要引入阈值判定机制。具体而言, 本文从误差分析与结果有效性判定的角度, 引入基于结构尺度的后验一致性约束。在工程实践中, 旋翼无人机的机体-旋翼距离 l 通常落在有限的物理合理区间内, 因此在参数反演完成后, 可依据该尺度范围设定 l 的允许偏差区间(相对误差约10%), 进一步地, 通过一阶误差传播分析反推出姿态角 ψ 和 θ 的允许误差范围 $\Delta\psi = |\psi_{est} - \psi_{sim}|$, $\Delta\theta = |\theta_{est} - \theta_{sim}|$, 其中 ψ_{est} 和 θ_{est} 表示的是通过步骤2计算出的姿态角, ψ_{sim} 和 θ_{sim} 表示的是一致性约束之后的结果, 具体流程为首先通过上述参数提取流程来实现对于目标结构以及运动参数的提取。随后在给定任意姿态角 (ψ, θ) 的条件下, 根据前文中提到的几何模型, 构造预测距离:

$$\hat{R}(t; \psi, \theta) = R_0 + \mathbf{u}^T(\psi, \theta) \mathbf{p}(t) \quad (38)$$

其中, $\mathbf{u}(\psi, \theta)$ 是由 ψ 和 θ 决定的雷达视线单位向量, $\mathbf{p}(t)$ 是由 (r_a, f, l) 决定的旋翼散射点轨迹。然后根据预测距离公式构造全序列一次性代价函数:

$$J(\psi, \theta) = \sum_{k=1}^K |R(t_k) - \hat{R}(t_k; \psi, \theta)|^2 \quad (39)$$

该代价函数衡量在给定姿态角下, 物理模型对整个距离-时间曲线的解释能力。最终通过最小化代价函数得出 ψ_{sim} 和 θ_{sim} 。

$$(\psi_{sim}, \theta_{sim}) = \underset{\psi, \theta}{\operatorname{argmin}} J(\psi, \theta) \quad (40)$$

由反推结果表明, 当 $\Delta\psi \leq 2.75^\circ$ 且 $\Delta\theta \leq 3.3^\circ$ 时, 参数 ψ 和 θ 的估计结果是可靠的, 可以用于后续参数估计过程; 否则, 需要重新提取距离-时间曲线的极值点。综上, 基于涡旋电磁波的旋翼无人机目标参数的提取步骤如下:

步骤1 对回波信号进行自相关处理, 计算出旋翼无人机旋翼的转速 f 。

步骤2 通过式(35)、式(36)推导出欧拉角中的 ψ 和 θ , 并进行阈值判断。

步骤3 采用STFT对回波信号进行时频分析, 提取径向多普勒频率的峰值及其对应时刻。

步骤4 依据峰值时刻计算出 φ_{LOS} , 并结合步骤2计算出的 ψ 和 θ 求解欧拉角中的 ϕ 。

步骤5 基于欧拉角的信息, 计算出目标的 θ_{LOS} 。

步骤6 根据径向多普勒频率的峰值, θ_{LOS} 以及 f 计算出旋翼无人机的旋翼长度 r_a 。

步骤7 计算回波信号的旋转多普勒, 并基于

微多普勒频移包含的旋转多普勒计算出旋翼无人机机体到旋翼的长度。

3 飞鸟与旋翼无人机仿真实验与分析

本节对所提出的目标运动参数提取算法的性能表现开展测试,为在主瓣能量与探测距离之间取得平衡,既避免低模式下旋转多普勒难以检测,又避免高模式下导致信噪比下降,并同时兼顾工程实现可行性,本文最终选择OAM模式为 ± 10 。仿真参数设置如表1所示。

3.1 飞鸟目标的参数估计

首先对鸟类目标的回波信号进行了频率与自相关函数分析,结果如图5所示。由图5(a)可以看出,目标鸟身的反射回波强度最为显著,结合式(17)可知,鸟类目标的运动速度与回波信号频谱峰值对应的平动多普勒所包含的径向多普勒频移存在一定的关联。由此计算得出目标运动速度为2.011 m/s,

表 1 主要仿真参数

Tab. 1 Primary simulation parameters

参数	数值
中心频率 f_0	10 GHz
带宽	200 MHz
OAM模式大小	-10和10
鸟类目标的扑翼频率 f_{bird}	2 Hz
鸟类目标的飞行速度 v	2 m/s
鸟类目标的距离、方位角、俯仰角	(100 m, 60°, 10°)
鸟类目标的扑翼长度 l_{bird}	0.5 m
旋翼无人机的旋转频率 f	50 Hz
旋翼无人机的旋翼长度 r_a	0.5 m
旋翼无人机机体到旋翼的长度 l	1 m
旋翼无人机的欧拉角 (ψ, θ, ϕ)	(60°, 30°, 45°)
旋翼无人机的距离、方位角、俯仰角	(500 m, 30°, 45°)

与仿真设定的2 m/s几乎完全一致,验证了方法的有效性。进一步的,对于鸟类目标的扑翼频率,其可通过提取自相关函数的极值点实现,如图5(b)所示, $f_{bird}=1/T$ 。最终得到目标的扑翼频率为2 Hz,与仿真设定的值相一致。

为了估计鸟类目标的扑翼长度,需先提取回波信号中的平动多普勒包含的旋转多普勒频率,并结合式(16)获取目标的扑翼长度,图6展示了对回波信号经STFT处理后的时频分析结果。从仿真结果可以看出,微多普勒频率的变化趋势与理论推导高度一致。鸟类目标的微多普勒频率主要源于躯干、左翅膀和右翅膀3部分的贡献。

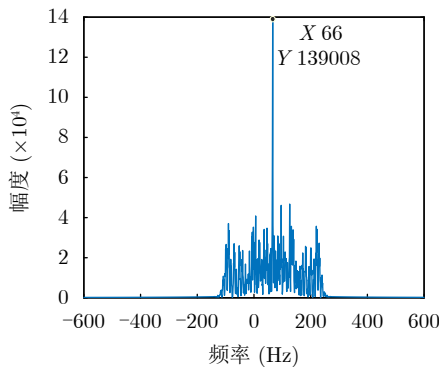
针对鸟类目标,若其躯干以稳定速度沿平移方向运动,所产生的平动多普勒频率包含的径向多普勒频率在时间维度上呈现恒定值,而双翼扑动产生的周期性运动,会使平动多普勒频率中包含的旋转多普勒频率随时间呈现近似三角函数的变化规律,该现象与理论模型预测结果高度吻合。

在实验分析中,图7分别呈现了发射携带OAM模式为+10与-10的两种涡旋电磁波时,鸟类目标左翼回波信号的频谱分布。基于式(4)的理论推导,结合图7中频谱特征信息,可计算得到左翼的旋转多普勒频率^[31-34]为0.632 Hz。将该旋转多普勒频率代入式(17)进行联立求解,最终得到目标的扑翼长度约为0.484 m,与仿真设定值0.500 m几乎相一致,充分验证了所提方法对鸟类目标扑翼长度参数估算的准确性。

然而,飞鸟目标的扑翼运动通常存在一定的随机抖动,其频率难以保持恒定。因此,可将鸟类扑翼频率视为随时间变化的函数,表示为

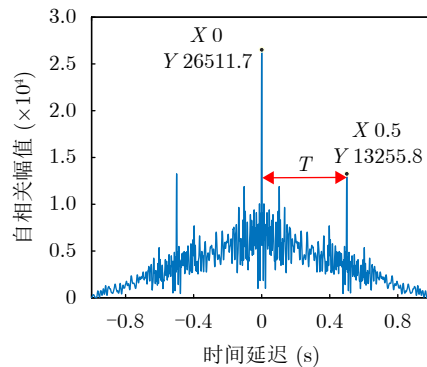
$$\psi(t) = A \cos(2\pi f_{bird}t + \sin(4\pi f_{bird}t)) \quad (41)$$

在理想情况下引入高频调制(非线性扑翼)后,



(a) 频谱分析图

(a) Spectrum analysis graph



(b) 自相关函数分析图

(b) Autocorrelation function analysis graph

图 5 鸟类目标回波信号分析图

Fig. 5 Analysis of the echo signal of the bird target

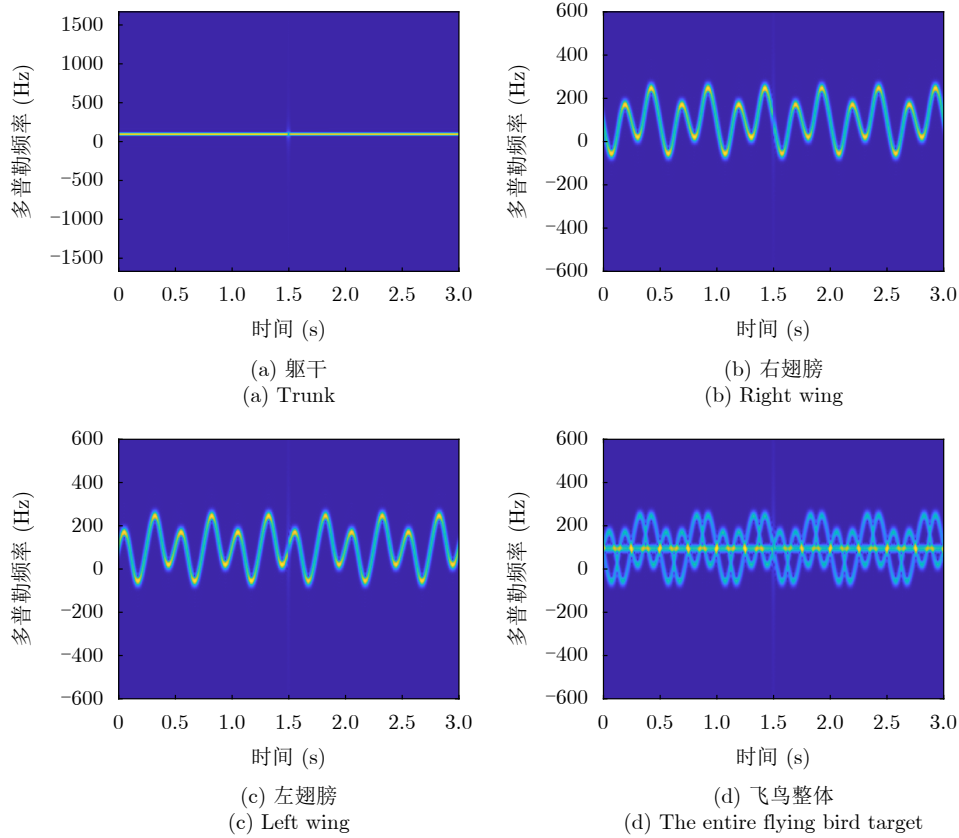


图 6 鸟类目标时频图

Fig. 6 Time-frequency representations of the bird target components

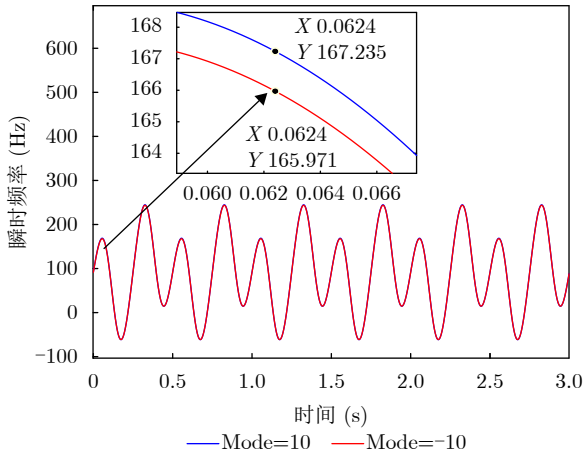


图 7 不同OAM模式下的扑翼的微多普勒频率

Fig. 7 Doppler frequencies of flapping wings with different OAM mode numbers

对回波信号进行频谱分析并进一步采用自相关函数处理。仿真结果表明，当加入高频调制时，自相关函数计算出 $T=0.5$ ，因此扑翼频率 $f_{\text{brid}}=1/T=2$ Hz，与仿真设定的值相一致。在频谱分析中，回波强度最大的多普勒频率约为66 Hz，代入式(16)可得到目标的运动速度为2.011 m/s，和真实值基本一致。对于旋转多普勒频率，由于翅膀运动存在一定抖动，其多普勒频率会产生波动；在引入高频调制

后，该影响更加明显，旋转多普勒频率为0.6 Hz，由此反演得到翅膀长度约为0.458 m，误差约为8%。尽管与理想情况存在一定偏差，但仍能够较为准确地表征出飞鸟目标的翅膀长度。

3.2 旋翼无人机目标的参数估计

首先，计算得出目标在UCA坐标系下的时变坐标曲线以及自相关函数，结果如图8所示，首先提取时变坐标曲线的最低点，并基于该点信息，结合式(36)计算得到目标参数的 $\psi=60.25^\circ$ ， $\theta=29.82^\circ$ 与仿真设定的 60° 和 30° 基本一致，验证了该参数估计方法的有效性。随后对回波信号进行自相关函数处理，结果如图8(b)所示。根据自相关函数的极值点可确定 $T=0.02$ s，据此计算旋翼无人机的旋翼频率为 $f=1/T=50$ Hz，与仿真设定的频率相一致。

此外，对回波信号采用STFT进行时频分析，获得目标的时频曲线。如图9(a)所示，时频曲线的最大值及其对应时刻为(9829.45 Hz, 0.01522 s)。结合式(31)，首先计算微多普勒频移中径向多普勒频率最大值对应的 φ_{LOS} 的大小，进而求得 ϕ 为 44.68° ，与仿真设定的 45° 高度一致。同时，基于式(31)以及时频曲线的最大值，计算得出旋翼无人机的旋翼长度为0.5017 m，与仿真设定的0.5 m高度吻合。

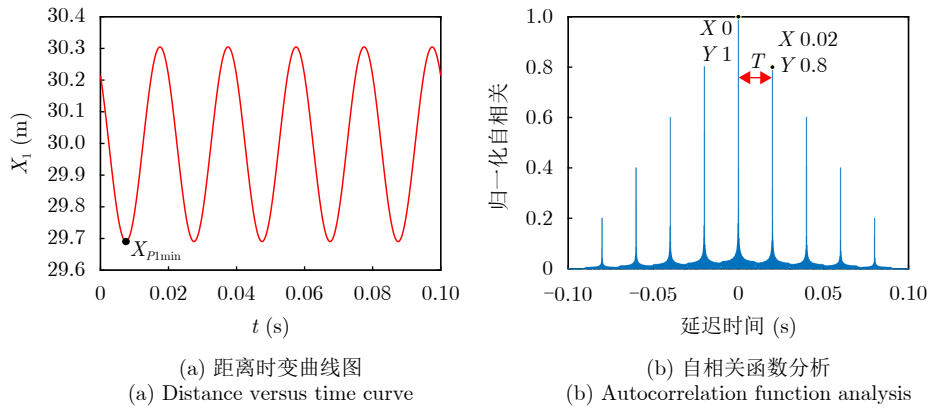


图8 旋翼无人机的回波信号分析图

Fig. 8 Analysis of the echo signal of the rotor UAVs

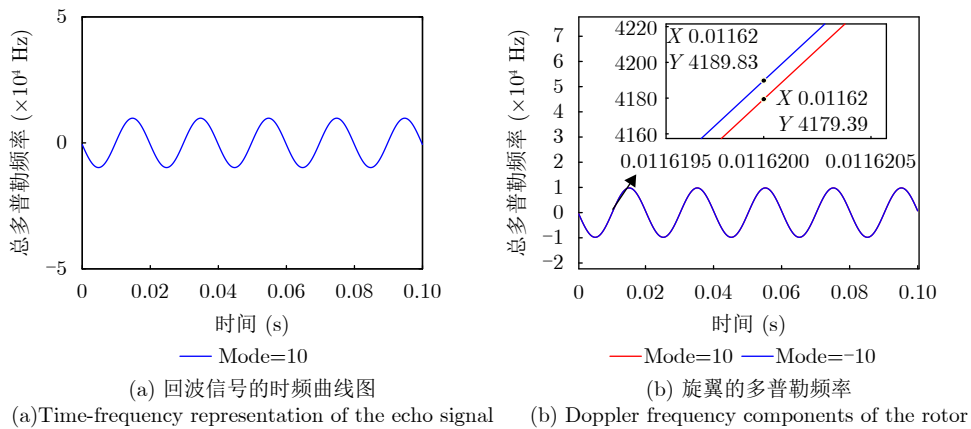


图9 旋翼无人机时频曲线图

Fig. 9 Time-frequency curves of the rotor UAVs

图9(b)表示的是发射携带OAM模式为+10和-10的两种涡旋电磁波时,旋翼无人机目标的频谱图。从图中可以读取此时旋翼无人机的微多普勒频移中的旋转多普勒为5.22 Hz,将其代入式(33)计算,得到旋翼无人机机体到旋翼之间的距离为1.026 m,与仿真设定的1 m几乎一致。

应该指出,上述研究场景都是基于单散射点,对于实际场景中存在的密集散射点状况,需要先通过快速独立成分分析(Fast Independent Component Analysis, FICA)^[35,36],以最大负熵为目标,经数据去均值化、白化处理消除相关性后,通过定点迭代最大化信号非高斯性,从混合信号中初步分离各成分;再针对分离后残留的噪声干扰,采用Otsu法^[37]确定双阈值对时频图量化,保留高能量有效区域并经二维中值滤波去噪,构建时频掩码生成纯净时频图;最后基于隐马尔可夫模型的动态规划思想,在满足瞬时频率点时频值最大化、连续点频率差值最小化假设下,通过初始化观测概率、递推最优路径及回溯序列,从去噪后的时频图中提取稳定连续的微多普勒时频曲线。基于上述方法,可以对密集散

射点目标开展仿真实验。选取旋翼无人机平台,对其表面5个随机分布的散射点进行同步建模,最终得到的多普勒频率仿真结果如图10所示。

通过对图10(d)进行分析,提取得到目标的旋转多普勒频率约为7.0526 Hz;基于该频率反演的无人机机体至旋翼的距离为1.184 m。尽管该反演结果与仿真设定值存在一定偏差,但整体识别精度仍可达80%左右,依然可验证所提方法的有效性。

针对包含飞鸟与旋翼无人机的多目标混合场景下的区分与识别问题,本文同样进行了系统分析,并对各目标的多普勒信息进行了同步提取,其结果如图11所示。

由图11可知,旋翼无人机的旋转多普勒频率为5.501 Hz,鸟类目标的旋转多普勒频率为0.638 Hz,与文中给定的仿真结果基本一致。进一步将鸟类目标与旋翼无人机目标的旋转多普勒频率分别代入参数提取流程,可计算得到鸟类翅膀长度为0.492 m,旋翼无人机旋翼长度为1.057 m,均与仿真设定值高度吻合,从而验证了本文所提出方法在多目标混合场景下仍具有较高的探测与参数反演能力。

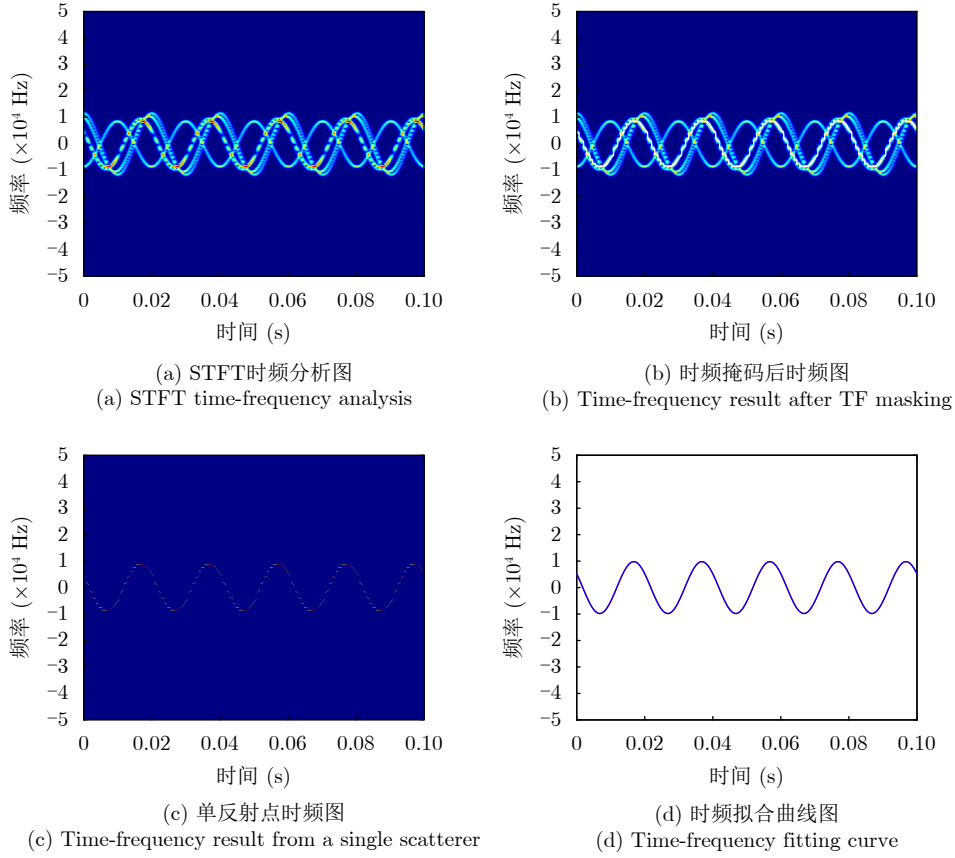


图 10 旋翼无人机随机散射点的时频结果图

Fig. 10 Time-Frequency results of random scatterers on rotor UAVs

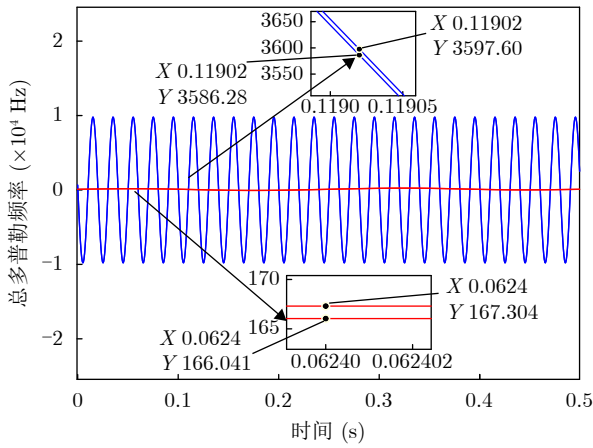


图 11 多目标场景下的多普勒频率

Fig. 11 Doppler frequency characteristics in a multi-target scenario

3.3 鸟类目标及旋翼无人机目标的参数分析

前文已完成多普勒频移参数的提取与估计，为验证该参数估计结果的准确性，本节引入参数估计误差的定义，具体为

$$\delta = \left| \hat{X} - X \right| / X \quad (42)$$

其中， \hat{X} 表示的是参数估计值， X 为参数真实值。

基于该定义，鸟类目标和旋翼无人机目标的具体参数估计结果和归一化误差数据如表2所示。由表2可见，所有参数的估计值与真实值之间的偏差较小，归一化误差处于低水平，进一步验证了所提方法在鸟类与旋翼无人机参数提取方面的有效性与合理性。

为验证所提出方法在噪声环境下的参数估计鲁棒性，我们在信噪比为0~25 dB的情况下，通过100次蒙特卡罗仿真实验开展参数估计误差定量分

表 2 估计结果以及归一化误差

Tab. 2 Estimated results and corresponding normalized errors

参数	真实值	估计值	δ (%)
f_{bird}	2 Hz	2 Hz	0
v	2 m/s	2.011 m/s	0.55
l_{bird}	0.5 m	0.485 m	3
f	50 Hz	50 Hz	0
r_a	0.5 m	0.5017 m	0.34
l	1 m	1.006 m	0.6
ψ	60°	60.25°	0.41
θ	30°	29.82°	0.6
ϕ	45°	44.68°	0.7

析, 图12呈现了鸟类和旋翼无人机目标的参数估计误差结果。

如图12(a)和图12(b)所示, 当信噪比处于较低水平时, 时频曲线受噪声干扰显著增强, 导致参数估计误差明显增多。而从图12(c)和图12(d)能够清晰观察到, 在常规场景下, 当信噪比提升到10 dB时, 鸟类目标的扑翼频率、飞行速度、扑翼长度以及旋翼无人机的旋翼旋转频率、旋翼长度、机体到旋翼的距离、欧拉角等各项参数的估计误差均能控制在5%以内。这一结果充分表明, 即便面临噪声干扰, 所提方法仍能维持较高的参数提取精度, 进一步验证了其优异的抗噪声鲁棒性, 为实际复杂噪声环境中的目标参数估计提供了可靠支撑。

对于旋翼无人机多叶片下和不同转速下的微多普勒特征如图13所示。

图13(a)表示的是同一个旋翼下4个叶片的微多普勒频率特征, 可以看出其多普勒特征为4条交替的正弦曲线, 图13(b)表示的是两个叶片在不同转速下的微多普勒频率特征, 由式(31)可以看出旋翼

无人机的转速可以直接影响微多普勒频率幅度的大小, 并且微多普勒频率受到转速的影响。表3表示的是飞鸟和旋翼无人机的参数及其特征对比表。

由表3可知, 通过对鸟类目标与旋翼无人机目标进行时频分析, 可以发现其多普勒特性存在显著差异。鸟类目标的多普勒频率由躯干(近似恒定频率)以及左右翅膀(近似三角函数变化的频率)共同组成, 表现为低频、非对称调制特征; 而旋翼无人机则因高速旋翼旋转, 呈现出高频、对称的正弦曲线簇特征, 多叶片旋翼会产生多条交替分布的频率曲线, 其频率幅值随转速变化。整体上, 旋翼无人机的多普勒频率幅值普遍高于鸟类目标。同时, 鸟类的翅膀扑动频率通常低于旋翼无人机的桨叶转速, 因此其调制特征对应的频率范围也相对较小。基于这一差异, 可以利用多普勒频率及其推导出的目标运动参数作为有效依据, 更加精确地区分无人机与鸟类目标。

为充分验证本文所提出参数提取方法的创新性与有效性, 我们将其与传统平面波方法^[38]以及文

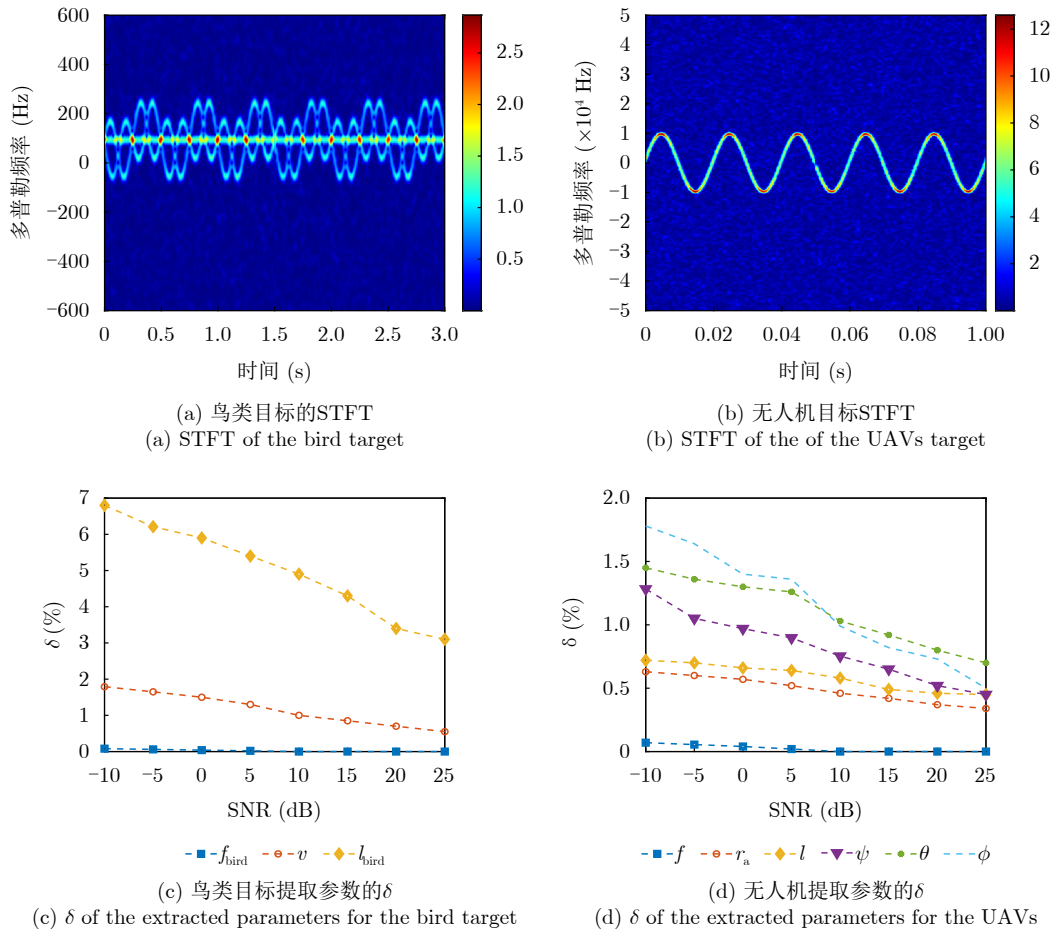


图 12 不同信噪比下参数估计的误差分析

Fig. 12 Error analysis of parameter estimation under different SNRs

献[24,25]中的相关技术进行了系统对比分析。结果表明，本文方法在复杂旋转目标的参数提取精度、抗噪性能以及物理可解释性方面均具有显著优势。此外，表4与表5分别给出了在相同实验场景与参数条件下，本文方法与传统平面波方法及文献[24,25]的参数估计精度对比。对比结果进一步验证了本文方法在目标运动与结构参数提取方面的显著优越性。

从表4可以看出，采用涡旋电磁波进行目标结构参数提取时，其估计误差显著小于传统平面波方法。相比之下，现有基于平面波的多普勒频率提取方法在旋翼无人机参数提取方面，多集中于旋翼转频及旋翼本体结构参数的估计，较少涉及无人机欧拉角、机体和旋翼半径等更全面的几何参数。由表5可知，文献[24,25]均围绕涡旋电磁波旋转多普

勒效应开展了锥形刚体目标参数估计方面的研究。其中，文献[24]主要聚焦于目标结构参数与转速信息的提取，对姿态角参数未作进一步讨论；文献[25]在结构参数估计的基础上，进一步考虑了姿态参数的联合提取问题，为相关研究提供了进一步的参考。因此，本文提出的基于涡旋电磁波的旋转多普勒频率提取方法，不仅能够同时获取鸟类与旋翼无人机的结构与运动参数，而且在参数种类和提取精度上均具有明显优势，为高精度目标识别与运动学分析提供了新的有效手段。

4 结语

本文针对飞鸟扑翼与旋翼无人机旋翼运动的复杂动力学特性，提出了一种以径向多普勒与旋转多

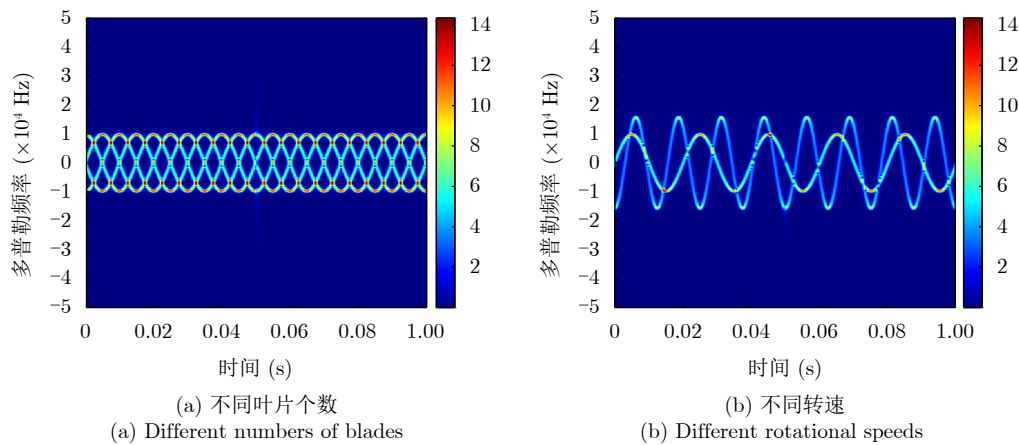


图 13 多普勒频谱特征

Fig. 13 Doppler spectrum characteristics

表 3 飞鸟和旋翼无人机的参数及其特征对比表

Tab. 3 Comparison of parameters and characteristics between birds and rotary-wing UAVs

参数	具体参数	飞鸟目标	旋翼无人机目标
最大多普勒频率	f_{max}	243.36 Hz	8829.45 Hz
多普勒频谱图	/	非对称周期性调制	对称的正弦曲线簇
旋转多普勒频率值	f_{D-a}	0.632 Hz	5.735 Hz
运动频率	ω	4π	100π

表 4 涡旋电磁波与传统平面波参数提取精度对比结果

Tab. 4 Comparison of parameter extraction accuracy between vortex electromagnetic waves and traditional plane waves

目标类型	参数	真实值	传统雷达估计值	传统雷达误差(%)	涡旋雷达估计值	涡旋雷达误差(%)
飞鸟 ^[8]	f_{bird}	2 Hz	2 Hz	0	2 Hz	0
	v	10 m/s	9.9309 m/s	0.7	9.9848 m/s	0.152
	h_{bird}	0.7 m	>0.63 m	<10	0.682 m	2.57
旋翼无人机 ^[38]	f	16.667 Hz	16.666 Hz	0.007	16.667 Hz	0
	r_a (m)	0.55	0.504	8.4	0.5489	0.2
	l (m)	1	/	/	1.006	0.6
	(ψ, θ, ϕ)	$(60^\circ, 30^\circ, 45^\circ)$	/	/	$(60.25^\circ, 29.82^\circ, 44.68^\circ)$	/

表5 涡旋电磁波参数提取对比表(%)
Tab. 5 Comparison of parameter extraction methods using vortex electromagnetic waves (%)

方法	SNR (dB)	r_a	ω	ψ	θ	ϕ	l
文献[24]	5	18.00	2.50	17.10	/	/	/
	15	8.52	1.47	4.56	/	/	/
	25	5.60	1.06	1.33	/	/	/
文献[25]	5	17.98	1.86	12.47	5.56	6.01	/
	15	7.88	1.33	4.67	2.90	3.15	/
	25	5.48	0.96	2.88	0.56	1.95	/
本文	5	0.52	0.04	1.36	1.26	0.89	0.64
	15	0.42	0.01	0.82	0.92	0.65	0.49
	25	0.34	0	0.50	0.70	0.45	0.45

普勒为核心驱动的统一参数提取方法。通过融合涡旋电磁波引入的旋转多普勒效应与目标平动产生的径向多普勒信息,构建了同时表征目标旋转与平动特性的参数提取框架。在建模层面,分别建立飞鸟与旋翼无人机的回波模型,对散射点的旋转与径向运动进行统一描述,推导了相应的径向与旋转多普勒频移表达式。在此基础上,结合重构微多普勒频率、距离-时间信息及双多普勒分离机制,实现了对扑翼周期、扑翼长度、旋翼长度、欧拉角及机体-旋翼距离等多种结构与运动参数的整体化高精度估计。仿真结果表明,该方法在低信噪比条件下仍具有良好的鲁棒性,并可在较少OAM模式数量条件下实现多参数高精度提取,有效降低了系统硬件复杂度,展现出良好的工程应用潜力。在时频处理方面,本文采用基于STFT的时频分析方法,主要考虑其计算复杂度低、实现简单且工程适配性较好,在所构建的仿真场景中能够稳定提取主要微多普勒调制轨迹。然而,受限于窗函数,STFT在分量强耦合或复杂场景下易出现时频能量扩散,从而影响微多普勒特征刻画精度。后续工作将引入高分辨率时频分析方法,如平滑伪维格纳-威利分布或同步挤压变换,以进一步提升复杂场景下的参数估计性能。

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

- JIAN M, LU Zhenzhong, and CHEN V C. Experimental study on radar micro-Doppler signatures of unmanned aerial vehicles[C]. 2017 IEEE Radar Conference, Seattle, USA, 2017: 854–857. doi: [10.1109/RADAR.2017.7944322](https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944322).
- DE WIT J J M, HARMANNY R I A, and PRÉMEL-CABIC G. Micro-Doppler analysis of small UAVs[C]. The 9th European Radar Conference, Amsterdam, Netherlands, 2012: 210–213.
- NANZER J A and CHEN V C. Microwave interferometric and Doppler radar measurements of a UAV[C]. 2017 IEEE Radar Conference, Seattle, USA, 2017: 1628–1633. doi: [10.1109/RADAR.2017.7944468](https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944468).
- RAHMAN S and ROBERTSON D A. Millimeter-wave micro-Doppler measurements of small UAVs[C]. SPIE 10188, Radar Sensor Technology XXI, Anaheim, USA, 2017: 101880T. doi: [10.1117/12.2261942](https://doi.org/10.1117/12.2261942).
- GOVONI M A. Micro-Doppler signal decomposition of small commercial drones[C]. 2017 IEEE Radar Conference, Seattle, USA, 2017: 425–429. doi: [10.1109/RADAR.2017.7944240](https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944240).
- HANIF A, MUAZ M, HASAN A, et al. Micro-Doppler based target recognition with radars: A review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(4): 2948–2961. doi: [10.1109/JSEN.2022.3141213](https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3141213).
- HARMANNY R I A, DE WIT J J M, and PRÉMEL-CABIC G. Radar micro-Doppler feature extraction using the spectrogram and the cepstrogram[C]. The 11th European Radar Conference, Rome, Italy, 2014: 165–168. doi: [10.1109/EuRAD.2014.6991233](https://doi.org/10.1109/EuRAD.2014.6991233).
- 陈宏昆, 察豪, 刘峰. 鸟类目标微多普勒分析及参数估计[J]. 电讯技术, 2019, 59(4): 431–436. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2019.04.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2019.04.011).
- CHEN Hongkun, CHA Hao, and LIU Feng. Micro-Doppler analysis and parameter estimation of bird target[J]. *Telecommunication Engineering*, 2019, 59(4): 431–436. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2019.04.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2019.04.011).
- RAHMAN S and ROBERTSON D A. Radar micro-Doppler signatures of drones and birds at K-band and W-band[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 17396. doi: [10.1038/s41598-018-35880-9](https://doi.org/10.1038/s41598-018-35880-9).
- 陈唯实, 李敬. 雷达探鸟技术发展与应用综述[J]. 现代雷达,

- 2017, 39(2): 7–17. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.02.002](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.02.002).
CHEN Weishi and LI Jing. Review on development and applications of avian radar technology[J]. *Modern Radar*, 2017, 39(2): 7–17. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.02.002](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.02.002).
- [11] LI Liulin, YUE Wei, KAI Chengzhi, *et al.* Perfect acoustic-vortexes constructed by the Fourier transform of quasi-Bessel beams based on the simplified ring array of sectorial planar transducers[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2023, 70(7): 748–758. doi: [10.1109/TUFFC.2023.3277854](https://doi.org/10.1109/TUFFC.2023.3277854).
- [12] 郭忠义, 王运来, 汪彦哲, 等. 涡旋雷达成像技术研究进展[J]. 雷达学报, 2021, 10(5): 665–679. doi: [10.12000/JR21075](https://doi.org/10.12000/JR21075).
GUO Zhongyi, WANG Yunlai, WANG Yanzhe, *et al.* Research advances in vortex radar imaging technology[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(5): 665–679. doi: [10.12000/JR21075](https://doi.org/10.12000/JR21075).
- [13] LI Liulin, LIU Bingyi, and GUO Zhongyi. Robust orbital-angular-momentum-based underwater acoustic communication with dynamic modal decomposition method[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2024, 155(5): 3195–3205. doi: [10.1121/10.0025988](https://doi.org/10.1121/10.0025988).
- [14] GUO Kai, LEI Shuang, LEI Yi, *et al.* Research on detecting targets' accelerations based on vortex electromagnetic wave in non-line-of-sight scenario[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(4): 4078–4084. doi: [10.1109/JSEN.2022.3232364](https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3232364).
- [15] WANG Jianqiu, LIU Kang, CHENG Yongqiang, *et al.* Three-dimensional target imaging based on vortex stripmap SAR[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(4): 1338–1345. doi: [10.1109/JSEN.2018.2879814](https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2879814).
- [16] 郭忠义, 汪彦哲, 郑群, 等. 涡旋电磁波天线技术研究进展[J]. 雷达学报, 2019, 8(5): 631–655. doi: [10.12000/JR19091](https://doi.org/10.12000/JR19091).
GUO Zhongyi, WANG Yanzhe, ZHENG Qun, *et al.* Advances of research on antenna technology of vortex electromagnetic waves[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(5): 631–655. doi: [10.12000/JR19091](https://doi.org/10.12000/JR19091).
- [17] 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](https://doi.org/10.1109/JSEN.2025.3533009).
- [18] 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](https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2490169).
- [19] LIU Kang, CHENG Yongqiang, YANG Zhaocheng, *et al.* Orbital-angular-momentum-based electromagnetic vortex imaging[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 711–714. doi: [10.1109/LAWP.2014.2376970](https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2376970).
- [20] LIU Hongyan, LIU Kang, CHENG Yongqiang, *et al.* Microwave vortex imaging based on dual coupled OAM beams[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(2): 806–815. doi: [10.1109/JSEN.2019.2943698](https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2943698).
- [21] 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](https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3329359).
- [22] WANG Siyuan, QU Yi, CHEN Yijun, *et al.* Three-dimensional interferometric imaging with vortex electromagnetic wave radar based on uniform circular array[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(20): 32858–32870. doi: [10.1109/JSEN.2024.3453869](https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3453869).
- [23] WANG Yu, LIU Kang, LIU Hongyan, *et al.* Detection of rotational object in arbitrary position using vortex electromagnetic waves[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(4): 4989–4994. doi: [10.1109/JSEN.2020.3032665](https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3032665).
- [24] 王煜, 刘康, 王建秋, 等. 涡旋电磁波雷达锥体目标旋转多普勒探测[J]. 雷达学报, 2021, 10(5): 740–748. doi: [10.12000/JR21074](https://doi.org/10.12000/JR21074).
WANG Yu, LIU Kang, WANG Jianqiu, *et al.* Rotational Doppler detection of a cone-shaped target under the illumination of a vortex electromagnetic wave[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(5): 740–748. doi: [10.12000/JR21074](https://doi.org/10.12000/JR21074).
- [25] ZHOU Hongping, PENG Chao, LEI Yi, *et al.* Estimating parameters of ballistic target by single hybrid radar based on vortex and wideband electromagnetic waves[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(21): 26423–26429. doi: [10.1109/JSEN.2023.3312442](https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3312442).
- [26] LI Rui, LI Liulin, ZHOU Hongping, *et al.* OAM-radar imaging: A review[J]. *Defence Technology*, in press, 2025. doi: [10.1016/j.dt.2025.11.021](https://doi.org/10.1016/j.dt.2025.11.021).
- [27] 屈海友, 程迪, 陈畅, 等. 涡旋雷达高分辨率稀疏自校正相位误差成像[J]. 雷达学报, 2021, 10(5): 699–717. doi: [10.12000/JR21094](https://doi.org/10.12000/JR21094).
QU Haiyou, CHENG Di, CHEN Chang, *et al.* High-resolution sparse self-calibration imaging for vortex radar with phase error[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(5): 699–717. doi: [10.12000/JR21094](https://doi.org/10.12000/JR21094).
- [28] 蒋彦雯, 范红旗, 李双勋. 基于稀疏贝叶斯学习的太赫兹电磁涡旋三维成像方法[J]. 雷达学报, 2021, 10(5): 718–724. doi: [10.12000/JR21151](https://doi.org/10.12000/JR21151).
JIANG Yanwen, FAN Hongqi, and LI Shuangxun. A sparse Bayesian learning approach for vortex electromagnetic wave three-dimensional imaging in the Terahertz band[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(5): 718–724. doi: [10.12000/JR21151](https://doi.org/10.12000/JR21151).
- [29] WANG Siyuan, CHEN Yijun, QU Yi, *et al.* Vortex electromagnetic radar imaging and adaptive resource scheduling based on uniform concentric circular arrays[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(14): 22658–22671. doi: [10.1109/JSEN.2024.3453869](https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3453869).

- 1109/JSEN.2024.3405969.
- [30] 罗迎, 龚逸帅, 陈怡君, 等. 基于跟踪脉冲的MIMO雷达多目标微动特征提取[J]. 雷达学报, 2018, 7(5): 575–584. doi: [10.12000/JR18035](https://doi.org/10.12000/JR18035).
- LUO Ying, GONG Yishuai, CHEN Yijun, *et al.* Multi-target micro-motion feature extraction based on tracking pulses in MIMO radar[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(5): 575–584. doi: [10.12000/JR18035](https://doi.org/10.12000/JR18035).
- [31] 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](https://doi.org/10.1109/LAWP.2021.3067914).
- [32] 郭忠义, 汪彦哲, 王运来, 等. 涡旋电磁波旋转多普勒效应研究进展[J]. 雷达学报, 2021, 10(5): 725–739. doi: [10.12000/JR21109](https://doi.org/10.12000/JR21109).
- GUO Zhongyi, WANG Yanzhe, WANG Yunlai, *et al.* Research advances on the rotational Doppler effect of vortex electromagnetic waves[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(5): 725–739. doi: [10.12000/JR21109](https://doi.org/10.12000/JR21109).
- [33] 林屹峰, 单明明, 孔旭东, 等. 涡旋电磁波轨道角动量模态抗干扰性能分析[J]. 雷达学报, 2021, 10(5): 773–784. doi: [10.12000/JR21096](https://doi.org/10.12000/JR21096).
- LIN Yifeng, SHAN Mingming, KONG Xudong, *et al.* Orbital angular momentum anti-interference properties analysis of electromagnetic vortex wave[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(5): 773–784. doi: [10.12000/JR21096](https://doi.org/10.12000/JR21096).
- [34] YUAN Hang, LUO Ying, CHEN Yijun, *et al.* Micro-motion parameter extraction of rotating target based on vortex electromagnetic wave radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2021, 15(12): 1594–1606. doi: [10.1049/rsn2.12149](https://doi.org/10.1049/rsn2.12149).
- [35] HYVARINEN A. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1999, 10(3): 626–634. doi: [10.1109/72.761722](https://doi.org/10.1109/72.761722).
- [36] XUE Yuanhe, YAN Wei, ZHOU Mengxia, *et al.* Electromagnetic interference feature extraction for permanent magnet synchronous motors currents based on fast independent component analysis[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2025, 71(4): 10057–10065. doi: [10.1109/TCE.2025.3615955](https://doi.org/10.1109/TCE.2025.3615955).
- [37] LIU Dongju and YU Jian. Otsu method and K-means[C]. The Ninth International Conference on Hybrid Intelligent Systems, Shenyang, China, 2009: 344–349. doi: [10.1109/HIS.2009.74](https://doi.org/10.1109/HIS.2009.74).
- [38] QIN Xiaoyu, DENG Bin, and WANG Hongqiang. Micro-Doppler feature extraction of rotating structures of aircraft targets with terahertz radar[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(16): 3856. doi: [10.3390/rs14163856](https://doi.org/10.3390/rs14163856).

作者简介

周红平, 副研究员, 主要研究方向为雷达干扰识别、复杂电磁环境下雷达目标识别、多目标跟踪等。

李睿, 硕士生, 主要研究方向为涡旋雷达成像与涡旋雷达探测。

李刘林, 博士生, 主要研究方向为声透镜、完美声涡旋以及涡旋通信等。

郭忠义, 教授, 主要研究方向为涡旋雷达系统、智能传感系统、偏振智能信息处理、先进光通信技术、复杂电磁环境等。

(责任编辑: 于青)