

基于单模态涡旋电磁波的平动旋转复合运动目标参数估计

谭政宽 刘康* 杨阳 陈雨馨 刘红彦

(国防科技大学电子科学学院 长沙 410073)

摘要: 近年来, 涡旋电磁波由于其独特的波前分布结构在运动目标探测方面具有重要价值, 而准确估计径向多普勒和旋转多普勒频移是对运动目标平动、旋转运动参数进行高精度测量的关键。然而, 现有基于涡旋电磁波的多普勒估计方法通常依赖于同时发射多个模态, 在高速运动目标场景下需要额外先验信息处理多普勒模糊, 并且径向-旋转多普勒分离精度有限。针对前述问题, 该文提出了一种基于自适应分段稀疏表征(APWSR)瞬时频率估计的单模态涡旋电磁波径向-旋转多普勒分离方法。通过引入多普勒压缩技术, 仅利用单模态回波即可实现径向与旋转多普勒分量的有效分离, 并利用APWSR实现高精度瞬时频率估计。在此基础上, 进一步提取了目标的平动速度、旋转半径、旋转频率及欧拉角等运动参数。仿真实验验证了所提方法的有效性与稳健性, 结果表明, 所提方法在多普勒频率与运动参数估计精度方面均优于已有双模态方法。

关键词: 涡旋电磁波; 单模态; 旋转多普勒; 运动目标; 参数估计

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2026)x-0001-16

DOI: 10.12000/JR25266

CSTR: 32380.14.JR25266

引用格式: 谭政宽, 刘康, 杨阳, 等. 基于单模态涡旋电磁波的平动旋转复合运动目标参数估计[J]. 雷达学报(中英文), 待出版. doi: 10.12000/JR25266.

Reference format: TAN Zhengkuan, LIU Kang, YANG Yang, *et al.* Parameter estimation of a moving target with combined translational and rotational motion based on single mode vortex electromagnetic waves[J]. *Journal of Radars*, in press. doi: 10.12000/JR25266.

Parameter Estimation of a Moving Target with Combined Translational and Rotational Motion Based on Single Mode Vortex Electromagnetic Waves

TAN Zhengkuan LIU Kang* YANG Yang CHEN Yuxin LIU Hongyan

(College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Vortex electromagnetic waves have proven highly effective for moving-target detection due to their distinctive wavefront phase distribution. Accurate estimation of translational and rotational Doppler shifts is essential for high-precision measurement of motion parameters. Existing methods typically rely on transmitting multiple modes of vortex electromagnetic waves, and they often require additional prior information to resolve Doppler ambiguities for high-speed targets, and the separation accuracy of translational and rotational Doppler components is limited. To address these challenges, this work proposes a single mode vortex electromagnetic wave-based Doppler separation method combined with Adaptive Piece-Wise Sparse Representation (APWSR) for high-precision instantaneous frequency estimation. Using the Doppler compression technique, translational

收稿日期: 2025-12-10; 改回日期: 2026-03-29; 网络出版: 2026-05-06

*通信作者: 刘康 liukang1117@126.com *Corresponding Author: LIU Kang, liukang1117@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(62401583, 62322122)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62401583, 62322122)

责任编辑: 罗迎 Corresponding Editor: LUO Ying

and rotational Doppler components can be effectively separated using only a single mode, while APWSR enables high-precision instantaneous frequency estimation. From these results, the translational velocity, rotation radius, rotational frequency, and Euler angles of the target are extracted. Simulations validate the effectiveness and robustness of the proposed method, demonstrating that it outperforms existing dual-mode approaches in Doppler frequency and motion parameter estimation.

Key words: Vortex electromagnetic wave; Single mode; Rotational Doppler; Moving target; Parameter estimation

1 引言

目标的运动特征在雷达回波上体现为多普勒频率调制^[1], 从多普勒信息中提取运动参数, 对目标探测、跟踪与识别具有重要意义。一般而言, 除质心平动以外, 雷达目标同时伴有振动、转动^[2,3]等微运动, 因此目标和雷达间相对运动所产生的多普勒频率同时包含整体平动和微动引起的多普勒, 目标微动产生的多普勒频率分量反映了目标更加精细的运动特征^[4,5]。转动是最为常见的微运动, 如卫星天线转动、弹头自旋、直升机旋翼转动等, 对目标平动和转动参数的精确估计能够为雷达目标检测与识别提供更多重要依据^[6-8]。

传统雷达发射平面波, 回波仅包含目标参数在径向上的投影, 因此仅能获得径向多普勒(Linear Doppler)分量。对于进行平动旋转的目标而言, 平面波雷达回波中的径向多普勒分量同时包含平动多普勒径向分量(平动在雷达视线方向上的投影引入的多普勒频率)和转动多普勒径向分量(转动在雷达视线方向上的投影引入的多普勒频率)。然而, 对于单站平面波雷达, 回波信息中仅包含单一视角的径向多普勒, 难以从中提取目标的平动和转动运动特征参数, 存在局限性^[9]。

电磁涡旋雷达^[10](Electromagnetic Vortex radar, EMV radar)发射携带有轨道角动量(Orbital Angular-Momentum, OAM)的涡旋电磁波, 其波束内呈螺旋形分布的相位波前, 为雷达探测带来了新的自由度^[11]。当采用携带不同模态OAM的涡旋电磁波照射运动目标时, 回波中除径向多普勒分量外, 还调制有与雷达径向垂直平面上的旋转运动参数, 产生旋转多普勒(Rotational Doppler)^[12,13]效应。电磁涡旋雷达的旋转多普勒效应能够在一定程度上提升信息获取自由度^[14], 使得单站雷达具备获取目标多维运动特征的潜力^[15]。

研究初期, 大部分学者基于无平动的旋转目标, 建立了电磁涡旋雷达旋转多普勒回波模型^[16], 提出了径向多普勒和旋转多普勒分离方法^[17], 获取了旋转目标的运动参数^[18]。文献^[19]还对锥体运动目标运动参数进行了估计。对于更复杂的平动旋转目

标, 袁航等人^[20]建立了电磁涡旋雷达对平动旋转目标的探测模型, 推导了其径向-旋转多普勒性质, 并基于1/4微动周期多普勒频率曲线, 提出了三维微动参数提取方法。但是其并未考虑径向多普勒频率与旋转多普勒频率的估计与分离方法, 而两种多普勒频率的分离是实现电磁涡旋雷达对目标多维参数估计的基础, 其效果决定了后续处理的精度。

目前已有的分离方法需要同时发射两个不同模态涡旋电磁波, 并且对两个模态回波计算时频分布, 从两条频率曲线的差异中分离两种多普勒信息。文献^[17]从0模态和一个非0模态回波的时频分布图像中提取时频脊线, 可以从0模态回波的时频脊线中提取径向多普勒频率曲线, 从非0模态回波中提取同时包含径向多普勒和旋转多普勒分量的总体多普勒频率曲线, 而后从两模态间的多普勒频率差值提取旋转多普勒。然而, 运动目标回波径向多普勒分量与发射信号的中心频率成正比, 而旋转多普勒分量只与转速和发射模态有关, 但是通常物体的转速相对较小, 且电磁涡旋雷达发射较高模态的实现较为困难, 因此涡旋电磁波回波中, 相比于径向多普勒分量, 旋转多普勒分量通常小几个数量级^[20]。这使得不同模态的时频分布图像差异较小, 难以利用图像处理方法实现径向-旋转多普勒的高精度分离。文献^[21]基于回波信号提出了一种径向多普勒补偿方法, 补偿后的回波经过低通滤波后仅包含旋转多普勒分量。但是, 该补偿方法效果依赖于第一阶段对径向多普勒频率的估计精度, 而通常回波时频分布表现为较宽的粗糙曲线, 导致瞬时频率估计精度较低。因此, 缺乏高精度的瞬时频率估计方法也是径向多普勒频率与旋转多普勒频率的分离方法的瓶颈。

在目前有关涡旋电磁波多普勒提取的研究中, 研究对象大多是单频连续波信号^[20,21]。而针对宽带脉冲体制少有人研究, 宽带信号可以视作多个单频信号, 该体制下雷达回波中应该包含更丰富的信息用于实现对目标运动参数的高精度估计。为此, 需要一种合适的方法, 能利用脉冲体制带来的优势, 具备利用单模态回波分离径向多普勒与旋转多普勒

分量的能力，以充分发掘电磁涡旋雷达获取多维运动参数的潜力。

本文基于脉冲体制下发射线性调频信号的电磁涡旋雷达，对“高速平动+旋转”运动目标的多维运动参数估计方法进行了研究。针对高速平动旋转目标的回波信号采用去调频(dechirp)方式进行接收处理，并提出了多普勒压缩方法，仅利用单个模态回波实现径向多普勒和旋转多普勒分量分离，有效降低了电磁涡旋雷达系统实现难度。在此基础上，本文提出了基于自适应分段稀疏表征的高精度瞬时频率估计方法，获得了高精度的径向多普勒和旋转多普勒瞬时频率曲线，最后通过分析获得了目标旋转半径、旋转频率等参数。仿真实验验证了多普勒分离方法和参数估计方法的有效性。现有方法和所提方法基于涡旋电磁波实现多普勒估计的特点总结于表1。

2 电磁涡旋雷达运动目标回波模型与多普勒分离方法

2.1 平动旋转复合运动目标观测几何模型

电磁涡旋雷达对一个正在进行平动旋转复合运动的刚体目标的探测场景如图1所示，其中 $Oxyz$ 表示雷达坐标系， $O_cx'y'z'$ 表示以目标中心点 O_c 为原点与雷达坐标系平行的参考坐标系， $O_cy''z''$ 为刚体运动目标的本体坐标系。

假设目标整体在进行直线平动，其中心点 $O_c(x_c(t_m), y_c(t_m), z_c(t_m))^T$ 在雷达坐标系下的位置随慢时间变化，雷达坐标系下目标整体运动速度为 $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)^T$ 其中 t_m 表示慢时间。目标上一散射点 q 在本体坐标系的 $x''O_cy''$ 平面上以半径 a_q 围绕旋转中心 O_c 旋转，雷达坐标系下散射点 q 位置的直角坐标 $(x_q(t_m), y_q(t_m), z_q(t_m))^T$ 可以表示为

$$\begin{aligned} \vec{O_cq} &= \vec{OO_c} + \mathbf{R}_r \vec{O_cq} = \begin{pmatrix} x_q(t_m) \\ y_q(t_m) \\ z_q(t_m) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} x_c + v_{cx}t_m + a_q \cos \psi_2 \cos(\omega_q t_m) \\ y_c + v_{cy}t_m + a_q A_1 \cos(\omega_q t_m - \varphi_1) \\ z_c + v_{cz}t_m - a_q A_2 \cos(\omega_q t_m + \varphi_2) \end{pmatrix} \quad (1) \end{aligned}$$

其中， a_q 和 ω_q 分别表示参考系下的旋转半径和旋转速度， (x_c, y_c, z_c) 表示运动目标的旋转中心初始坐标。 $\vec{O_cq}$ 为参考坐标系与目标的本体坐标重合时，参考系下的散射点 q 的矢量位置：

$$\vec{O_cq} = (a_q \cos \omega_q t_m, a_q \sin \omega_q t_m, 0)^T \quad (2)$$

其中，参考坐标系到目标本体坐标的三维旋转变换矩阵为

$$\mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi_1 & -\sin \psi_1 \\ 0 & \sin \psi_1 & \cos \psi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi_2 & 0 & \sin \psi_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi_2 & 0 & \cos \psi_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \psi_3 & -\sin \psi_3 & 0 \\ \sin \psi_3 & \cos \psi_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中， ψ_1, ψ_2, ψ_3 为欧拉角，分别表示绕 O_cx', O_cy', O_cz' 轴的旋转角度，由于 ψ_3 只影响多普勒频率曲线的初始相位而与多普勒频率曲线振幅和频率无关，因此可以忽略其中欧拉角 ψ_3 产生的影响^[20]。令式(3)中 $\psi_3 = 0$ ，对于式(1)中的参数 $A_1, A_2, \varphi_1, \varphi_2$ 满足以下关系：

$$\begin{cases} A_1 = \sqrt{\sin^2 \psi_1 \sin^2 \psi_2 + \cos^2 \psi_1} \\ A_2 = \sqrt{\cos^2 \psi_1 \sin^2 \psi_2 + \sin^2 \psi_1} \\ \varphi_1 = \arctan(1/(\tan \psi_1 \sin \psi_2)) \\ \varphi_2 = \arctan(\tan \psi_1 / \sin \psi_2) \end{cases} \quad (4)$$

综合上述分析，极坐标下散射点 q 位置 $(r_q(t_m), \theta_q(t_m), \phi_q(t_m))$ 可以表示为

$$\begin{cases} r_q(t_m) = \sqrt{x_q^2(t_m) + y_q^2(t_m) + z_q^2(t_m)} \\ \theta_q(t_m) = \arcsin\left(\frac{\sqrt{x_q^2(t_m) + y_q^2(t_m)}}{\sqrt{x_q^2(t_m) + y_q^2(t_m) + z_q^2(t_m)}}\right) \\ \phi_q(t_m) = \arctan\left(\frac{y_q(t_m)}{x_q(t_m)}\right) \end{cases} \quad (5)$$

散射点 q 相对于雷达坐标系原点的径向距离 $r_q(t_m)$ 满足等式

表 1 现有方法和所提方法的特点

Tab. 1 The characteristics of the existing methods and the proposed method

来源	目标类型	径向-旋转多普勒频率估计方法	模态/接收通道需求	发射信号体制
文献[16]	旋转(无平动)	未明确	未明确	单频连续波
文献[17]	旋转(无平动)	提取时频分布图像脊线	双模态回波	单频连续波
文献[18]	旋转(无平动)	提取时频分布图像脊线	双模态、多通道回波	线性调频脉冲体制
文献[19]	旋转(无平动)	参数化解调方法	双模态回波	单频连续波
文献[20]	平动+旋转	未明确	未明确	单频连续波
文献[21]	旋转(无平动)	径向参数补偿+滤波	多通道回波	单频连续波
本文	高速平动+旋转	多普勒压缩+滤波	单模态、单通道回波	线性调频脉冲体制

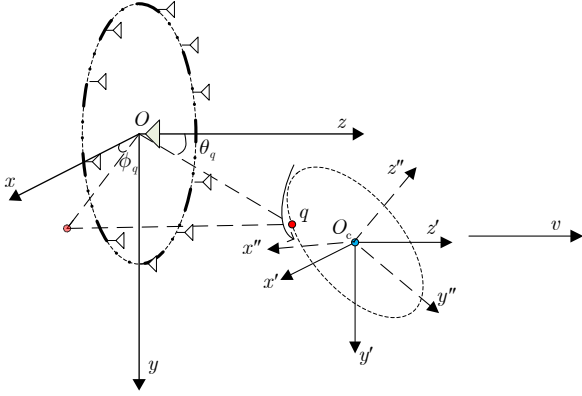


图1 电磁涡旋雷达照射下平动旋转目标运动几何

Fig. 1 Geometric of the target with translational-rotational motion illuminated by the electromagnetic vortex radar

$$\begin{aligned}
 r_q^2(t_m) = & r_c^2 + 2(x_c v_{cx} + y_c v_{cy} + z_c v_{cz})t_m \\
 & + (v_{cx}^2 + v_{cy}^2 + v_{cz}^2)t_m^2 + 2a_q \cos \theta_2 \cos(\omega_q t_m) \\
 & \cdot (x_c + v_{cx}t_m) + 2a_q A_1 \cos(\omega_q t_m - \varphi_1) \\
 & \cdot (y_c + v_{cy}t_m) - 2a_q A_2 \cos(\omega_q t_m + \varphi_2) \\
 & \cdot (z_c + v_{cz}t_m) + (a_q \cos \theta_2 \cos(\omega_q t_m))^2 \\
 & + (a_q A_1 \cos(\omega_q t_m - \varphi_1))^2 \\
 & + (a_q A_2 \cos(\omega_q t_m + \varphi_2))^2
 \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $r_c = \sqrt{x_c^2 + y_c^2 + z_c^2}$ 为参考坐标系原点相对于雷达坐标系初始距离。

对于刚体旋转目标, 其运动参数包括平动速度、旋转频率、旋转半径等, 为提取运动参数, 需要首先建立径向多普勒、旋转多普勒频率曲线与各个运动参数之间的关系。这里考虑目标主要在雷达前视区域运动这一常见雷达探测场景, 即目标在运动过程中始终保持在雷达视线轴附近。由于不同模式涡旋电磁波主瓣指向不一致, 为简化对波束控制等雷达控制过程的分析, 在该探测场景下, 本文选择较小模式的涡旋电磁波照射目标, 并假设在较短的时间窗口内目标始终在波束主瓣附近运动。实际应用中, 为保证在该探测场景下非0模式波束能够稳定照射目标, 可以采用波束导向等方法^[22]。根据式(1)和式(5), 可将式(6)中距离表达式 $r_q(t_m)$ 进一步近似为

$$\frac{2\pi}{l} f_{\text{rot}}(t_m) = \frac{\omega_q A_1 \cos \psi_2 \sin \varphi_1 - \omega_q A_1 \left(\frac{x_c}{a_q}\right) \sin(\omega_q t_m - \varphi_1) + \omega_q \cos \psi_2 \left(\frac{y_c}{a_q}\right) \sin \omega_q t_m}{\left(\frac{y_c}{a_q} + A_1 \cos(\omega_q t_m - \varphi_1)\right)^2 + \left(\frac{x_c}{a_q} + \cos \psi_2 \cos \omega_q t_m\right)^2} \quad (12)$$

为验证式(11)与式(12)理论近似值与实际多普勒频率曲线的拟合程度, 对一个平动速度为(0, 0, 800) m/s, 欧拉角为(60°, 45°, 0°), 转速为300 r/min, 旋转半径为0.3 m的平动旋转目标, 在中心频率为35 GHz的电磁波照射下, 验证了其实际多普勒频率与近似值的一致性。图2所示的多普

$$r_q(t_m) \approx r_c + v_I t_m + a_q A_3 \sin(\omega_q t_m + \varphi_3) \quad (7)$$

其中, v_I 为平动速度径向分量。

$$v_I = \frac{1}{r_c} (x_c v_{cx} + y_c v_{cy} + z_c v_{cz}) \quad (8)$$

同时有

$$\begin{cases} A_3 = \sqrt{\sin^2 \psi_1 + \cos^2 \psi_1 \sin^2 \psi_2} \\ \varphi_3 = \arctan\left(-\frac{\sin \psi_2}{\tan \psi_1}\right) \end{cases} \quad (9)$$

根据上述分析, 对于发射 l 模式涡旋电磁波, 平动旋转目标的回波模型可以表示为

$$\begin{aligned}
 S_q(\hat{t}, t_m, l) \approx & \sigma_q \varphi(\hat{t} - 2r_q(t_m)/c) \\
 & \cdot J_l(2\pi f_c a \sin \theta_q(t_m)/c) \\
 & \cdot e^{j l \phi_q(t_m)} e^{-j 4\pi f_c r_q(t_m)/c}
 \end{aligned} \quad (10)$$

其中, \hat{t} 快时间, f_c 为发射信号中心频率, σ_q 为目标 q 的散射系数, $\varphi(\cdot)$ 为基带波形。对式(6)中距离表达式进行时间求导, 得到径向多普勒表达式为

$$f_{\text{Los}}(t_m) \approx -2 \frac{f_c}{c} [v_I + a_q \omega_q A_3 \cos(\omega_q t_m + \varphi_3)] \quad (11)$$

其中, 平动速度、旋转频率、旋转半径等运动参数反映在多普勒频率曲线上, 而径向多普勒频率曲线以正弦函数的形式规律变化。若采用瞬时频率估计方法得到径向多普勒频率曲线的估计值后, 可以利用最小二乘法拟合正弦曲线的直流分量、振幅、相位和旋转频率 ω_q 参数, 从而计算出平动速度径向分量 v_I 和旋转半径的径向投影值 $a_q A_3$ 。但是单独的径向多普勒频率曲线因为缺少旋转运动参数, 并不能估计出完整的运动参数, 例如只能估计旋转半径的径向投影值 $a_q A_3$, 而非旋转半径, 因此需要提取出涡旋电磁波旋转多普勒频率曲线建立旋转多普勒与运动参数之间的关系。

假设在较短的观测时间内, 可以认为目标平行于雷达视线轴运动, 根据式(1)和式(5), 旋转多普勒频率^[20]满足如下关系:

勒近似值与实际值拟合曲线表明二者拟合程度良好, 由此进一步验证了采用式(11)和式(12)进行运动参数估计的可靠性。

由式(11)与式(12)可以建立运动参数与瞬时频率关系的方程, 需要注意的是, 仅由径向多普勒频率可以估计旋转角速度和旋转半径的径向投影 $a_q A_3$,

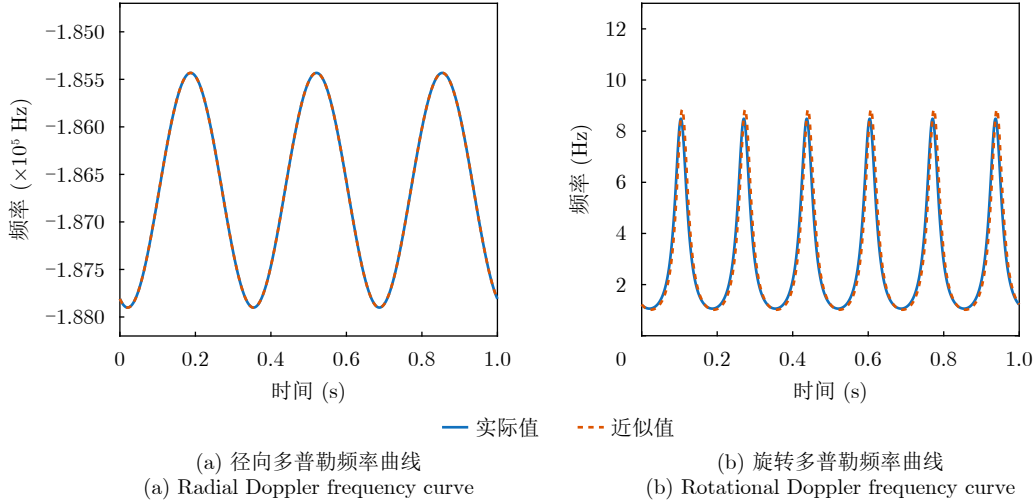


图 2 多普勒近似值与实际值拟合曲线

Fig. 2 Fitting curves between approximation Doppler and actual Doppler

但仅根据式(12)只能获得旋转半径与旋转中心坐标的相对比值 x_c/a_q 和 y_c/a_q 。得到旋转多普勒频率曲线之后,需要联立径向-旋转多普勒瞬时频率方程,获得上述运动参数的绝对估计值,再利用L-M算法求解该多元非线性方程组^[20],即可获得运动参数估计值。

2.2 电磁涡旋雷达回波多普勒压缩方法

当式(10)中发射波形为线性调频信号,并采用dechirp方式进行接收,接收信号表示为

$$S_{de}(\hat{t}, t_m, l) = \sum_{q=1}^Q A_q(l, t_m) \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \tau_q(t_m)}{T_p}\right) \cdot e^{-j\frac{4\pi}{c}\gamma(\hat{t} - 2r_{ref}/c)\Delta r_q(t_m)} \cdot e^{-j\frac{4\pi}{c}f_c\Delta r_q(t_m)} \cdot e^{j\frac{4\pi\gamma}{c^2}\Delta r_q(t_m)^2} \quad (13)$$

其中, $A_q(l, t_m) = \sigma_q J_l(2\pi f_c a \sin \theta_q(t_m)/c) e^{jl\phi_q(t_m)}$, $e^{jl\phi_q(t_m)}$ 包含了旋转多普勒频率信息。 γ 为调频率, $\Delta r_q(t_m) = r_q(t_m) - r_{ref}$, r_{ref} 为参考距离,式(13)中第3项为剩余视频项,通常利用“去斜处理”补偿掉剩余视频项,而后补偿 $e^{j4\pi f_c r_{ref}/c}$,沿雷达回波快时间方向作傅里叶变换,可以得到目标的距离像

$$S_{de-f}(f, t_m, l) = T_p \sum_{q=1}^Q \text{sinc}\left[T_p\left(f + \frac{2\gamma\Delta r_q(t_m)}{c}\right)\right] A_q(l, t_m) e^{-j\frac{4\pi}{c}f_c\Delta r_q(t_m)} \quad (14)$$

沿慢时间序列进行时频分析,可以从相位斜置项 $e^{-j\frac{4\pi}{c}f_c\Delta r_q(t_m)}$ 中得到常规的无压缩多普勒频率分析的结果,其径向多普勒频率分量仍然与中心频率 f_c 成正比,可能存在的多普勒跨周期模糊问题仍然不可避免。可以观察到,式(14)经过傅里叶逆变换到二维时域的信号表示为

$$S_{de}(\hat{t}, t_m, l) = \sum_{q=1}^Q A_q(l, t_m) e^{-j\frac{4\pi}{c}f_c\Delta r_q(t_m)} \cdot e^{-j\frac{4\pi}{c}\gamma\hat{t}\Delta r_q(t_m)} \quad (15)$$

此时,每个快时间点对应的慢时间序列可以视为一个单频信号,将同模态不同快时间点共轭相乘,得到

$$S_{de}(\hat{t}_i, t_m, l) \cdot S_{de}^*(\hat{t}_j, t_m, l) = \sum_{q=1}^Q |A_q(l, t_m)|^2 e^{-j\frac{4\pi}{c}\gamma(\hat{t}_i - \hat{t}_j)\Delta r_q(t_m)} + \sum_{\substack{q_1=1,2,\dots,Q \\ q_2=1,2,\dots,Q \\ q_1 \neq q_2}} A_{q_1}(l, t_m) A_{q_2}^*(l, t_m) \cdot e^{-j\frac{4\pi}{c}\gamma(\hat{t}_i\Delta r_{q_1}(t_m) - \hat{t}_j\Delta r_{q_2}(t_m))} \quad (16)$$

此时相位斜置项 $e^{-j\frac{4\pi}{c}f_c\Delta r_q(t_m)}$ 被消去,该序列变成两个快时间采样点“差频”对应的单频信号,该单频信号的频率被称为等效频率。对回波数据矩阵处理过程的示意图如图3所示,每个快时间采样点对应的慢时间序列即矩阵中的一行,数据矩阵中的行间距就是慢时间序列对应的快时间采样点间隔,该间隔决定了等效频率的大小。

由于式(16)中 Q 个散射中心的径向多普勒信息均包含在前面的自项中,后一求和项则为交叉项,为了抑制交叉项,可以对回波矩阵中多个快时间点对应慢时间序列共轭相乘的结果进行相参叠加,由于交叉项存在相位差异无法进行相干积累,而自项相位相同,积累可达到抑制交叉项的目的。若快时间采样点数为 T ,可以采用前 $1 \sim T/2$ 的快时间点对应的慢时间序列分别与 $T/2+1 \sim T$ 的快时间点对应的慢时间序列的共轭相乘,即式(16)中

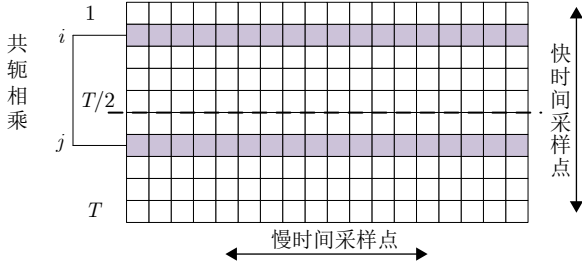


图3 回波数据矩阵处理过程示意图

Fig. 3 Schematic of the processing procedure for the echo data matrix

$i \in [1, 2, \dots, T/2]$, $j = i + T/2$, 而后将每组结果相干叠加, 可得到多普勒压缩后的慢时间序列。当积累的快时间采样点数 T 较多时, 信号的主项积累增益较高, 能够对交叉项起到一定的抑制作用。交叉项抑制效果可以通过进一步分析式(16)得到, 式(16)中交叉项可以改写为

$$\sum_{\substack{q_1=1,2,\dots,Q \\ q_2=1,2,\dots,Q \\ q_1 \neq q_2}} A_{q_1}(l, t_m) A_{q_2}^*(l, t_m) e^{-j\frac{4\pi}{c}\gamma\Delta t\Delta r_{q_1}(t_m)} \cdot e^{-j\frac{4\pi}{c}\gamma\hat{t}_j(\Delta r_{q_1}(t_m) - \Delta r_{q_2}(t_m))} \quad (17)$$

其中, $\hat{t}_i - \hat{t}_j = \Delta t$ 。对求和项中任意一组两个散射点 q_1, q_2 的交叉项进行分析。令两散射点间距 $\Delta r_{q_1}(t_m) - \Delta r_{q_2}(t_m) = \Delta r_{12}$, 幅度项乘积 $A_{q_1}(l, t_m) \cdot A_{q_2}^*(l, t_m) e^{-j\frac{4\pi}{c}\gamma\Delta t\Delta r_{q_1}(t_m)} = A_{q_1q_2}$ 。对式(17)进行积累, 积累后的 q_1, q_2 交叉项可以表示为积分形式:

$$A_{q_1q_2} \int_{T/2}^T e^{-j\frac{4\pi}{c}\gamma\hat{t}_j\Delta r_{12}} d\hat{t}_j \quad (18)$$

其中, 进行积累的快时间采样间隔为 $T_p/2$, 令 $x = \gamma\hat{t}_j$, 带宽 $B = \gamma T_p$, 式(18)可化简为

$$A_{q_1q_2} \int_{B/2}^B e^{-j\frac{4\pi x}{c}\Delta r_{12}} dx = A_{q_1q_2} \frac{B}{2} e^{-j\frac{3\pi\Delta r_{12}}{c}B} \cdot \text{sinc}\left(\frac{B\Delta r_{12}}{c}\right) \quad (19)$$

由于主项相当于 $\Delta r_{12} = 0$ 的情况, 结合上述分析可计算出积累处理使得式(16)中交叉项相对于主项的衰减量为

$$D = \frac{\left| A_{q_1q_2} \int_{B/2}^B e^{-j\frac{4\pi x}{c}\Delta r_{12}} dx \right|}{\left| A_{q_1q_2} \int_{B/2}^B e^{-j\frac{4\pi x}{c}0} dx \right|} = \frac{\left| A_{q_1q_2} \int_{B/2}^B e^{-j\frac{4\pi x}{c}\Delta r_{12}} dx \right|}{A_{q_1q_2} B/2} = \left| e^{-j\frac{3\pi\Delta r_{12}}{c}B} \text{sinc}\left(\frac{B\Delta r_{12}}{c}\right) \right| = \left| \text{sinc}\left(\frac{B\Delta r_{12}}{c}\right) \right| \quad (20)$$

式(20)中的衰减量反映了上述的积累处理方法

对交叉项的抑制效果是随散射点间距而变化的 sinc 函数。交叉项的抑制效果与散射点间距有关, 在带宽一定的情况下, 总体变化趋势是随着两散射点间距增大抑制效果不断提升。若多个散射点距离较近, 可以通过增加带宽的方式增强对交叉项的抑制。若多个散射点的间距大于距离分辨率, 可忽略式(16)交叉项的影响。忽略交叉项后得到多普勒压缩后的慢时间序列为

$$S_f(t_m, l) = \sum_{i=1}^{T/2} S_{\text{de}}(\hat{t}_i, t_m, l) \cdot S_{\text{de}}^*(\hat{t}_{i+T/2}, t_m, l) \approx T/2 \sum_{q=1}^Q |A_q(l, t_m)|^2 e^{-j\frac{2\pi}{c}B\Delta r_q(t_m)} \quad (21)$$

其中对于任意的 i , $\hat{t}_i - \hat{t}_{i+T/2} = T_p/2$, 此时序列 $S_f(t_m)$ 表示为以带宽 $B/2$ 为频率的单频信号, 而带宽相较于雷达中心频率通常低 2 个数量级, 若要进一步降低等效频率, 可以减少慢时间序列对应的快时间采样点间隔。上述操作相当于进行了“多普勒压缩处理”, 能够解决多普勒模糊问题。

进行多普勒压缩处理后的径向多普勒可表示为

$$f_{\text{Los}}(t_m) \approx -\frac{B}{c} [v_r + a_q \omega_q A_3 \cos(\omega_q t_m + \varphi_3)] \quad (22)$$

为验证上述多普勒压缩方法效果, 用中心频率为 35 GHz, 带宽 300 MHz, 脉冲重复频率为 10 kHz, 模态为 0 的涡旋电磁波照射一个平动速度为 (0, 0, 800) m/s, 欧拉角为 (60°, 45°, 0°), 转速为 300 r/min, 旋转半径为 0.3 m 的平动旋转目标, 得到回波多普勒压缩前后的时频分布如图 4 所示, 其中压缩方式与式(21)相同, 所得到的压缩后多普勒频率曲线等价于以 $B/2$ 为中心频率的单频信号对应的多普勒频率。

从结果图中可以发现, 图 4(a) 中压缩前的理论多普勒频率曲线远远超出了多普勒频率不模糊范围 -5000~5000 kHz, 因此多普勒压缩前在时频分布上实际观测到的频率曲线可能会产生折叠, 观测结果如图 4(b) 所示。压缩后的结果见图 4(d), 相比于图 4(c) 频率曲线形状不变, 仅在中心多普勒频率和正弦函数振幅上产生了压缩, 压缩比为 35 GHz/150 MHz \approx 233.33。图 4(d) 压缩后的多普勒频率曲线完全落在不模糊区间内, 相比于压缩前的多普勒频率曲线中出现的多普勒跨周期模糊现象得到了解决。对于高速运动目标, 该方法等效于降低了其径向运动速度。

2.3 径向多普勒与旋转多普勒分离方法

首先介绍文献[17]中提供的基于双模态涡旋电

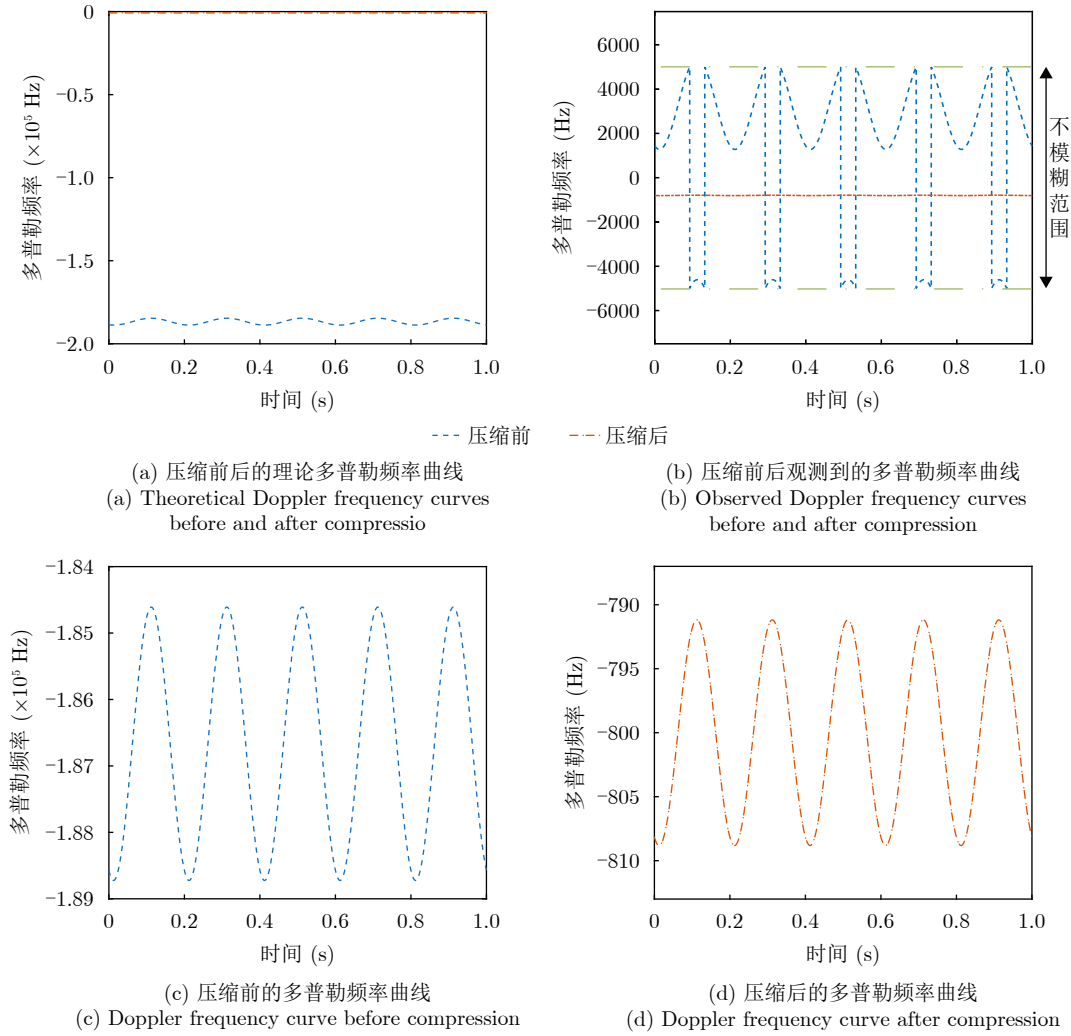


图 4 多普勒压缩前后的多普勒频率曲线图

Fig. 4 Doppler frequency curves before and after Doppler compression

磁波回波多普勒分离方法处理思路。该方法需要同时发射两个不同模态的涡旋电磁波，为分离径向多普勒和旋转多普勒，需要对两个不同模态的回波序列进行干涉。

$$\begin{aligned}
 S_f(t_m, l_1, l_2) &= \sum_{i=1}^T S_{de}(\hat{t}_i, t_m, l_1) \cdot S_{de}^*(\hat{t}_i, t_m, l_2) \\
 &\approx T \sum_{q=1}^Q e^{j(l_1 - l_2)\phi_q(t_m)} \\
 &\quad \cdot |A_q(l_1, t_m) A_q(l_2, t_m)| \quad (23)
 \end{aligned}$$

其中， l_1 和 l_2 两个模态回波的同一快时间点对应慢时间序列进行共轭相乘，可以将 T 个快时间点的数数据全部用于叠加，由于主项相位固定得到了相参积累，因此可以在式(23)中忽略交叉项的影响。双模态分离方法通常采用一个0模态和一个非0模态涡旋电磁波，径向多普勒可以从0模态涡旋电磁波回波中直接得到。然而，双模态分离方法对雷达系统有

一定要求，需要雷达能够同时发射两个模态涡旋电磁波，或者雷达具备全数字接收能力可以采用“涡旋接收”模式。

上述分离方法需要用到两个模态，对于电磁涡旋雷达硬件系统要求较高，方法局限性较大，有必要研究单模态回波下径向多普勒与旋转多普勒分离方法。事实上，在采用式(21)所示的多普勒压缩方法之后，可以仅用单模态回波数据分离两种多普勒频率。可以观察到式(21)中，有关模态 l 的相位项 $e^{jl\phi_q(t_m)}$ 由于共轭相乘包含在 $|A_q(l, t_m)|^2$ 中而对消，因此无论模态 l 取何值，压缩后的多普勒频率曲线仅包含径向多普勒分量。基于上述特点，本文仅用单个非0模态涡旋电磁波回波，即可实现径向多普勒分量与旋转多普勒分量的分离，具体步骤如下：

步骤1 采用时频分析方法处理式(21)信号，获得压缩后的径向多普勒频率曲线；

步骤2 对求得的压缩多普勒频率曲线进行

“解压缩”，还原出未压缩的径向多普勒频率曲线；

步骤3 根据未压缩的径向多普勒频率曲线求解模糊数；

步骤4 对模态回波采用时频分析方法，获得总多普勒频率曲线，根据步骤3所得模糊数进行解模糊；

步骤5 提取压缩前的径向多普勒频率曲线和模态回波的总多普勒频率曲线，二者相减以分离出旋转多普勒频率曲线。

3 电磁涡旋雷达瞬时径向-旋转多普勒频率高精度估计方法

在上述步骤4中，总多普勒频率曲线的提取需要通过时频分析方法，因此，为在有限时间窗口内实现高精度的径向-旋转多普勒频率估计，对时频分析的精度提出了更高的要求。文献[17]中提出的双模态分离方法从时频分布图像中提取时频脊线作为瞬时频率估计值，其估计精度较低，从而不能较好地获取目标精确的运动参数。为得到较高精度的旋转多普勒频率以实现更加准确的运动参数估计，本节基于解模糊后的电磁涡旋雷达运动目标回波，提出了自适应分段稀疏表征(Adaptive Piece-Wise Sparse Representation, APWSR)的瞬时频率估计方法，能够适用于多普勒频率曲线跨周期模糊情况下的径向-旋转多普勒估计与分离。

3.1 二阶调频信号拟合

对得到的回波可以用瞬时频率函数来表征，若将瞬时频率函数在时间点 t_m 处展开为泰勒级数。为保证实现弯曲效果，并控制计算量，可以采用二阶调频(Quadratic Frequency Modulation, QFM)信号对信号瞬时频率函数进行拟合。此时，式(15)和式(21)所示多普勒压缩前后的信号均可统一表述为

$$S(t_m, l) \approx \sum_{q=1}^Q A_q(t_m, l) \exp \left\{ j2\pi \int_0^{t_m} \left[f_q(t_m) + f_q^{(1)}(t_m)(\tau - t_m) + \frac{1}{2} f_q^{(2)}(t_m) \cdot (\tau - t_m)^2 \right] d\tau \right\} \quad (24)$$

其中， $A_q(\cdot)$ 和 $f_q(\cdot)$ 分别表示第 q 个分量的幅度和瞬时频率，变量 τ 为积分变量， $f_q^{(1)}(\cdot)$ ， $f_q^{(2)}(\cdot)$ 分别表示 $f_q(\cdot)$ 的第一，二阶导数， t_m 为展开点。在观测时间段内用 Q 个二阶调频信号逼近 $S(t_m, l)$ ，模态确定后 $S(t_m, l)$ 可简写为 $S(t_m)$ ，分段QFM信号模型可表示为

$$S(t_m) = \sum_{k=1}^K S_k(t_m) = \sum_{k=1}^K \sum_{q=1}^Q A_q(t_m) S_{q,k}(t_m) \quad (25)$$

其中， K 为划分的短时段数量， $S_k(t_m)$ 表示 $S(t_m)$ 的第 k 个局部段， $S_{q,k}(t_m)$ 表示 $S(t_m)$ 的第 q 个分量的第 k 个局部段。对于 $t_m \in [t_{m;k,1}, t_{m;k,2}]$ 时间段内的信号 $S_{q,k}(t_m)$ ，有

$$S_{q,k}(t_m) \approx \exp \left\{ j2\pi \int_{t_{m;k,1}}^{t_{m;k,2}} \left[f_q(t_m) + f_q^{(1)}(t_m) \cdot (\tau - t_m) + \frac{1}{2} f_q^{(2)}(t_m) (\tau - t_m)^2 \right] d\tau \right\} \quad (26)$$

其中， t_m 被限制在以 t_m 为中心的 k 个信号段的时间窗口 $[t_{m;k,1}, t_{m;k,2}]$ 内。为保证QFM逼近的精度，采用自适应高斯窗控制 $[t_{m;k,1}, t_{m;k,2}]$ 的宽度，使信号段内部准平稳^[23,24]。实际应用中，在计算信号第1个采样点的窗宽后，迭代推进至下一分段点，直至将整个信号划分为 K 个具有高逼近精度的分段。

3.2 APWSR瞬时频率估计

为精确估计每个信号段的瞬时频率，需要准确估计对应的瞬时QFM参数。然而，由于估计在短时区间内进行，可用信号样本极少。在此情况下，基于最大似然估计^[25,26]传统参数估计方法的性能会显著下降，但是稀疏表示方法仍能有效工作，并有助于获得更高的估计精度^[27]。因此，可将上述QFM参数估计问题表征为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}_k &= \arg \min_{\mathbf{X}_k} \|\mathbf{X}_k\|_0 \\ \text{s.t. } \mathbf{S}_k &= \mathbf{D}_k \cdot \mathbf{X}_k \end{aligned} \quad (27)$$

其中， \mathbf{X}_k 为 $N \times 1$ 的系数向量， $\mathbf{S}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 为对 $S_k(t_m)$ 信号的离散时间采样， $\hat{\mathbf{X}}_k \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 为短时信号的期望稀疏表示。理想情况下， $\hat{\mathbf{X}}_k$ 应仅含 Q 个非零值。 $\mathbf{D}_k = [\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_N]$ 为 $M \times N$ 的QFM字典，其中第 n 个原子^[28]为

$$\mathbf{d}_n = \exp \left[j2\pi \left(\frac{\beta_{1,n}}{3} m^3 + \frac{\beta_{2,n}}{2} m^2 + \beta_{3,n} m \right) \right] \quad (28)$$

其中， $m = 0, 1, \dots, M-1$ 表示离散的慢时间序列， $\beta_{1,n}$ ， $\beta_{2,n}$ 和 $\beta_{3,n}$ 分别为第 n 个原子的曲率参数、调频率和初始频率。

为保证稀疏求解精度的同时避免较高的计算成本，需要缩小QFM参数空间 $(\beta_1, \beta_2, \beta_3)$ 范围以减小字典矩阵 \mathbf{D}_k 和待求量 \mathbf{X}_k 维度。实际应用中需考虑参数接近真实值的原子，因此首先需采用短时傅里叶变换(Short-Term Fourier Transform, STFT)方法对瞬时频率进行粗估计，进行分段划分并确定参数范围，而后构建自适应QFM字典^[29]。作为时频

关系中的一阶和二阶分量，调频率 $\beta_{2,n}$ 和初始频率 $\beta_{3,n}$ 在确定时间窗口后，可以相对容易地从时频分布中获取其参数范围。在采用自适应高斯窗控制划分每个瞬时频率曲线分段之后，每个分段可以用二阶曲线拟合，根据分段内最大频率点和最小频率点的取值及时刻，结合二次函数的理论，可以确定曲率参数 β_1 的取值范围，这里给出结论：对于任意连续短时信号分量 $s_{q,k}(t)$ 最匹配的QFM原子，其曲率参数 β_1 满足

$$-\frac{f_{\max} - f_{\min}}{(t_{m;\max} - t_{m;\min})^2} \leq \beta_1 \leq \frac{f_{\max} - f_{\min}}{(t_{m;\max} - t_{m;\min})^2} \quad (29)$$

其中， $(t_{m;\max}, f_{\max})$ 和 $(t_{m;\min}, f_{\min})$ 分别表示 $S_{q,k}(t_m)$ 瞬时频率轨迹分段最大频率值点 L_{\max} 和最小频率值点 L_{\min} 的坐标，应用中由于这两点坐标未知，需要使用STFT方法得到的初步估计结果中最大最小值的坐标 $(\hat{t}_{m;\max}, \hat{f}_{\max})$ 和 $(\hat{t}_{m;\min}, \hat{f}_{\min})$ 进行计算。

在考虑估计误差后，将生成两个频率集合：

$$\begin{cases} \mathbf{F}_1 = \{\hat{f}_{\max} - \alpha \cdot f_{\Delta}, \dots, \hat{f}_{\max} + \alpha \cdot f_{\Delta}\} \\ \mathbf{F}_2 = \{\hat{f}_{\min} - \alpha \cdot f_{\Delta}, \dots, \hat{f}_{\min} + \alpha \cdot f_{\Delta}\} \end{cases} \quad (30)$$

其中， αf_{Δ} 为考虑的最大估计误差，点数 α 和步长 f_{Δ} 为根据场景自定义。根据式(30)， \mathbf{F}_1 和 \mathbf{F}_2 的值共有 $(2\alpha + 1)^2$ 种排列组合。对于某一排列 $(f_{\mathbf{F}_1}, f_{\mathbf{F}_2})$ ，生成曲率参数 $\hat{\beta}_1$ 的候选序列：

$$\hat{\beta}_1 = [-\hat{\beta}_{1,\max}, -\hat{\beta}_{1,\max} + \Delta\beta_1, \dots, \hat{\beta}_{1,\max} - \Delta\beta_1, \hat{\beta}_{1,\max}] \quad (31)$$

其中， $\hat{\beta}_{1,\max} = \frac{f_{\mathbf{F}_1} - f_{\mathbf{F}_2}}{(t_{m;\max} - t_{m;\min})^2}$ ， $f_{\mathbf{F}_1}$ 和 $f_{\mathbf{F}_2}$ 表示集合 \mathbf{F}_1 和 \mathbf{F}_2 中的某一元素， $\Delta\beta_1$ 为用户定义的参数采样步进间隔。由于最匹配QFM原子的拟合的瞬时频率曲线接近于 $S_{q,k}(t_m)$ 的瞬时频率，因此有

$$\begin{cases} f_{\max} = \beta_1 t_{m;\max}^2 + \beta_2 t_{m;\max} + \beta_3 \\ f_{\min} = \beta_1 t_{m;\min}^2 + \beta_2 t_{m;\min} + \beta_3 \end{cases} \quad (32)$$

将式(31)的值代入式(32)，从而确定 β_2 和 β_3 向量的候选值，以此可以构建包含最匹配QFM原子的 $(2\alpha + 1)^2$ 个子字典。对于单一段 $S_k(t_m)$ 的完整字典，其包含了 $Q(2\alpha + 1)^2$ 个子字典。

对于式(27)所描述的稀疏重构问题，可以采用计算复杂度相对较低的正交匹配追踪(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)^[30]算法求解。首先从字典中获得最匹配的 Q 个QFM原子，随后通过所选原子的参数重构 $S_k(t_m)$ 的瞬时频率。对全部 K 个分段逐个处理后，将结果拼接即可得到 $S(t_m)$ 的瞬时频率估计。综上所述，APWSR瞬时频率估计流程可描述为：

步骤1 对信号进行STFT得到瞬时频率的粗略估计结果；

步骤2 根据频率粗略估计结果计算自适应高斯窗，确定每个分段窗口宽度后，将信号自适应划分为 K 个短时分段；

步骤3 采用稀疏重构算法构建自适应QFM字典，并求解 Q 个QFM原子的参数；

步骤4 根据QFM信号的参数重构每个信号段 $S_k(t_m)$ 的瞬时频率；

步骤5 重复步骤3、步骤4，直到全部 K 个分段处理完毕；

步骤6 将所有 K 个分段结果组合，生成完整的局部瞬时频率估计结果。

图5展示了在图4(d)参数下的APWSR瞬时频率估计方法和STFT方法的估计结果，无论整体图还是局部放大图，APWSR方法更加逼近理论值，APWSR方法在频率估计精确度和对细节的恢复方

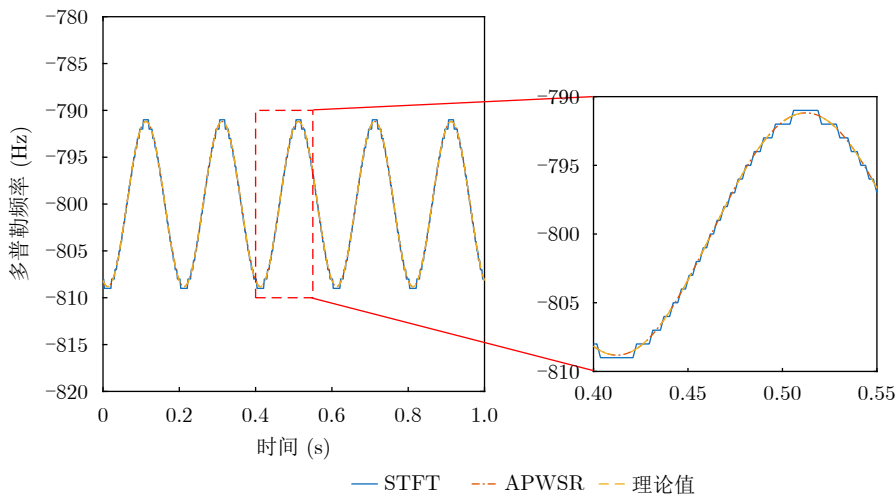


图 5 APWSR算法求解结果

Fig. 5 Estimation results of the APWSR algorithm

面表现更好。所提方法本质上可以看作对STFT方法的扩展,增加了稀疏求解的步骤,以提高计算量的代价得到了较高的频率估计精度。需要注意的是,虽然理论上缩小参数步长能够提高估计精度,但也会增强原子间的相关性,使稀疏重构结果变得不稳定,因此式(31)中参数步长选择还需兼顾预期的估计精度与稀疏恢复算法。

当目标运动速度较高、多普勒频率超出不模糊范围时,将产生两种多普勒模糊情况:一是多普勒频率曲线在观测频率范围内仍然连续;二是多普勒频率曲线在多次折叠后不连续,即图4(b)中跨周期模糊的情况。对于前者,上述方法仍然可以求解,结果仅相差对应的模糊频率。若出现后者,将导致瞬时多普勒频率曲线上各点的模糊数不一致,多普勒频率曲线不连续,不满足式(29)的情况,如果没有模糊数的信息,上述方法将失效。

结合上述提出的多普勒压缩方法和APWSR瞬时频率估计方法,本文所提方法可以在模糊条件下利用单模态涡旋电磁波回波数据实现径向-旋转多普勒分离。首先可采用多普勒压缩方法,将频率曲线压缩到无模糊的频率观测区间进行APWSR瞬时频率估计,获得压缩后的径向多普勒频率曲线后,根据压缩前后所对应的“中心频率”比值恢复无压缩的径向多普勒频率曲线,并为包含“径向+旋转”的总多普勒提供解模糊信息。在此基础上,本文所提出的APWSR瞬时频率估计方法可以直接估计无模糊的总多普勒,而后通过总多普勒与解压缩的径向多普勒频率曲线差异提取出旋转多普勒信息以用于后期的参数估计。结合上述分析,图6展示了APWSR瞬时频率估计的单模态涡旋电磁波径向-旋转多普勒分离方法流程,该方法不仅能够适用于低速运动的平动旋转目标无模糊的参数估计情形,也能够有效解决现有双模态方法无法解决的高速运动引入的多普勒频率跨周期模糊问题。

4 仿真实验结果与分析

为验证本文所提方法有效性和对运动参数估计精度,本节开展了仿真实验。电磁涡旋雷达探测目标为平动旋转目标上的一个散射点,其相应旋转中心初始位置为(0.2 m, 0.3 m, 100 m),平动速度为(0, 0, 1007 m/s),以 z 轴为旋转轴,转速为180 r/min,欧拉角为(10°, 5°, 0°),表2展示了电磁涡旋雷达的主要仿真参数。

需要注意的是,在无额外波束调控的情况下为保证目标在涡旋波主瓣附近运动,本文采用的是波束主瓣靠近雷达视线轴的较小模态。其中本文提出的基于APWSR瞬时频率估计的单模态涡旋电磁波

径向-旋转多普勒分离方法,仅需对OAM模态为1的涡旋电磁波回波进行处理,即可提取径向多普勒和旋转多普勒频率曲线。为展现所提方法优势,仿真结果将与文献[17]提出的基于STFT的双模态径向-旋转多普勒分离方法(双模态STFT方法)进行对比。为在相同参数的情况下分离出径向多普勒和旋转多普勒,双模态STFT方法[17]还需额外发射0模态涡旋电磁波。

首先对多普勒压缩后的回波进行瞬时频率估计,图7展示了在表2参数下,分别采用APWSR瞬时频率估计方法和STFT方法对压缩后的模态1回波多普勒频率曲线估计结果。在初始信噪比为10 dB的条件下,相比提取STFT时频脊线的传统方法,本文所提的APWSR算法仍能对多普勒压缩后的回波实现较高精度的瞬时频率估计。无论整体图还是局部放大图,APWSR方法更加逼近理论值,并且在频率的精确度和细节恢复方面表现更好。

而后对图7中压缩后的径向多普勒频率曲线进行解压缩处理,从而获得与雷达中心频率对应的无压缩径向多普勒频率曲线以及其对应的模糊信息。

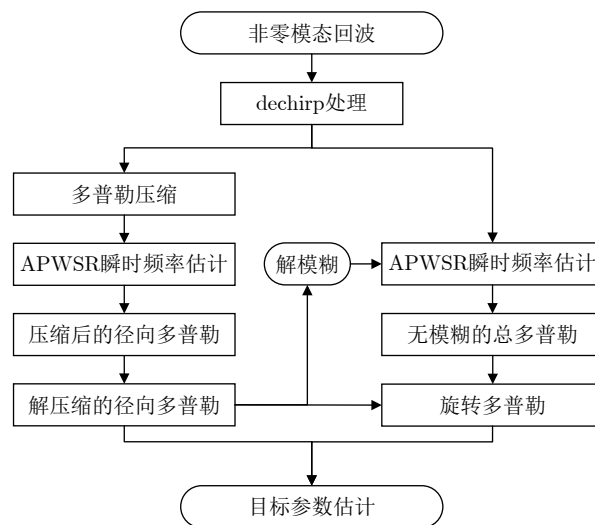


图6 单模态涡旋电磁波径向-旋转多普勒分离方法

Fig. 6 Method of separation electromagnetic vortex wave radial-rotational Doppler with single mode

表2 电磁涡旋雷达主要仿真参数

Tab. 2 Key parameters of EMV radar

参数	数值
中心频率 f_c	35 GHz
带宽 B	300 MHz
脉冲宽度 T_p	1 μ s
脉冲重复频率 T_r	10 kHz
发射模态 l	1

通过直接乘以压缩倍数的解压缩方法，可以获得图8(a)所示多普勒频率曲线；图8(b)所示的多普勒频率曲线则是先对压缩后的径向多普勒频率曲线进行参数估计，根据式(7)拟合出的无压缩多普勒频率曲线。图8结果表明，无论采用何种解压缩方法，相比于STFT方法所得频率估计结果，APWSR瞬时频率估计方法都能够以较好的精度接近实际的多普勒频率曲线。因此，采用APWSR瞬时频率估计方法能够高精度地还原出无模糊的径向多普勒频率曲线，从而保证精确分离旋转多普勒和径向多普勒分量。

在提取径向多普勒频率后，需要对模态1原始回波总多普勒频率进行估计。由于在压缩与解压缩环节已获得多普勒模糊信息，本文所提方法具备直接获取不模糊总多普勒频率的能力。但是STFT方法只能得到多普勒不模糊范围内的多普勒信息(如

图9所示)，要恢复真实多普勒频率需要与多普勒模糊数有关的额外先验信息。为对比所提方法在估计精度方面的性能，这里假设采用双模态STFT方法时多普勒模糊信息已预先获得。APWSR方法与STFT方法估计出的总多普勒频率如图10所示，在整体趋势上，两种方法均能反映实际频率随时间的变化规律，但在频率曲线部分细节处，两种方法所得估计结果表现出不同精度。STFT方法所得结果在局部区域上与实际值存在一定偏差，频率曲线出现轻微的偏移；而APWSR方法所得结果在全局范围内均与真实值高度一致，尤其在局部放大图中几乎完全重合，能够更加准确地刻画频率的微小变化。上述仿真结果表明，本文所提方法得到的瞬时频率估计结果更加接近实际的瞬时频率，在估计精度上优于双模态STFT方法。

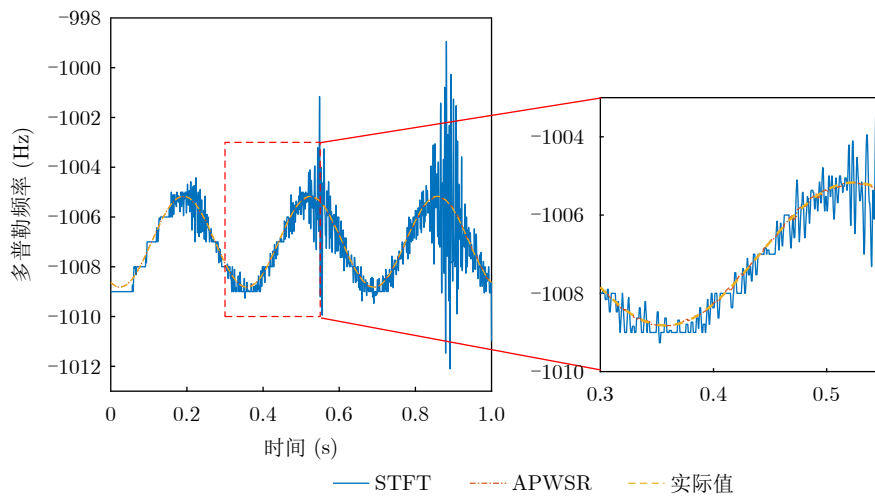


图 7 模态1多普勒频率曲线估计结果

Fig. 7 Estimation results of the Doppler frequency curve under OAM mode 1

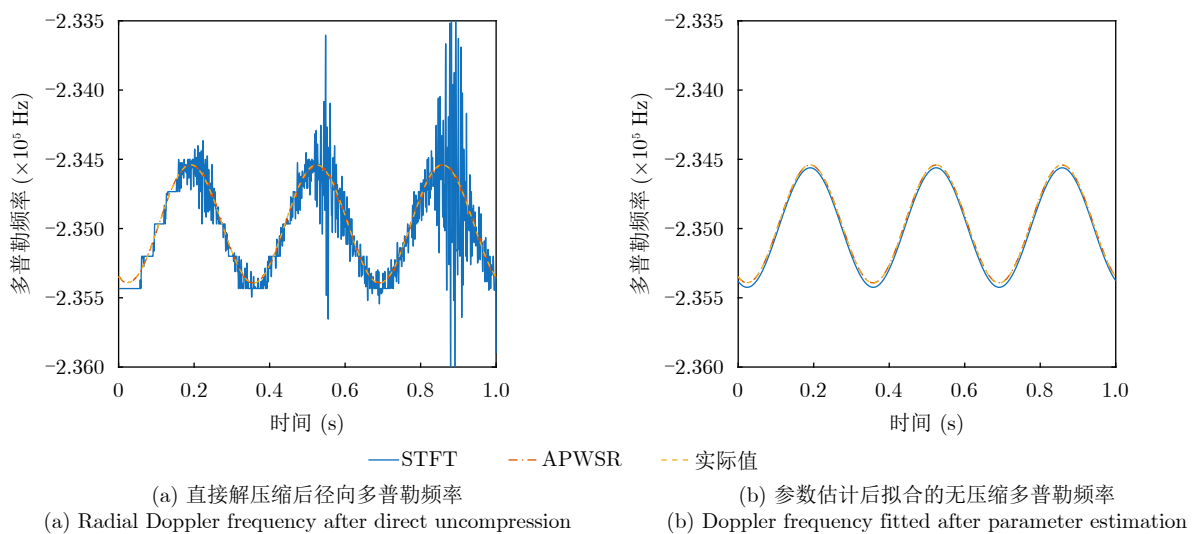


图 8 解压缩后径向多普勒曲线

Fig. 8 Radial Doppler curves after decompressed

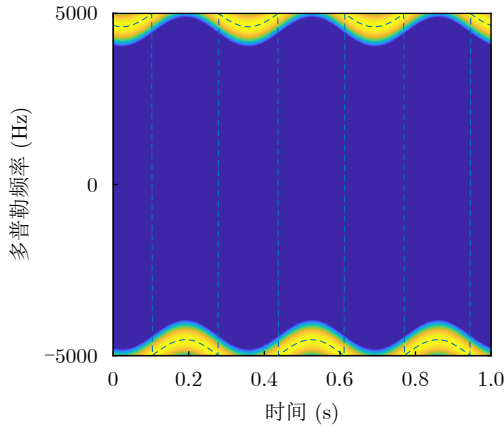


图9 STFT方法对应的总多普勒时频图

Fig. 9 Time-frequency diagram of the total Doppler with the STFT method

为得到径向多普勒频率曲线,采用双模态STFT方法时还需要对0模态回波进行频率估计,其径向

多普勒频率估计结果与本文所提方法得到的径向多普勒频率估计结果共同展示在图11(a)中。图11(a)结果表明,即使仅采用了单模态回波,本文所提方法同样能够准确估计出径向多普勒频率。在两种方法下,分离出旋转多普勒频率见图11(b)。本文所提方法与双模态STFT方法均能有效匹配实际多普勒频率曲线的变化趋势,但两者在估计精度方面存在一定差异,双模态STFT方法在峰值处能够较好地反映变化,但在非峰值区域波动较大,曲线存在明显抖动。相比之下,本文所提方法始终与多普勒频率曲线保持较好的一致性,尤其在峰值与谷值处相比双模态STFT方法更加稳定。

得到旋转多普勒频率曲线估计值后,提取不同时间点的频率估计值,根据式(12)列出多元非线性方程组,而后采用L-M算法对方程组进行求解,结合式(7)所求得运动参数,即可解出目标的欧

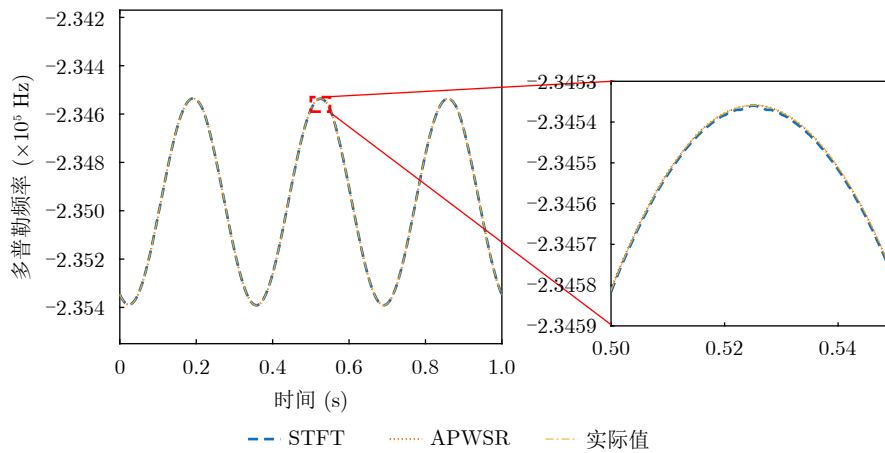
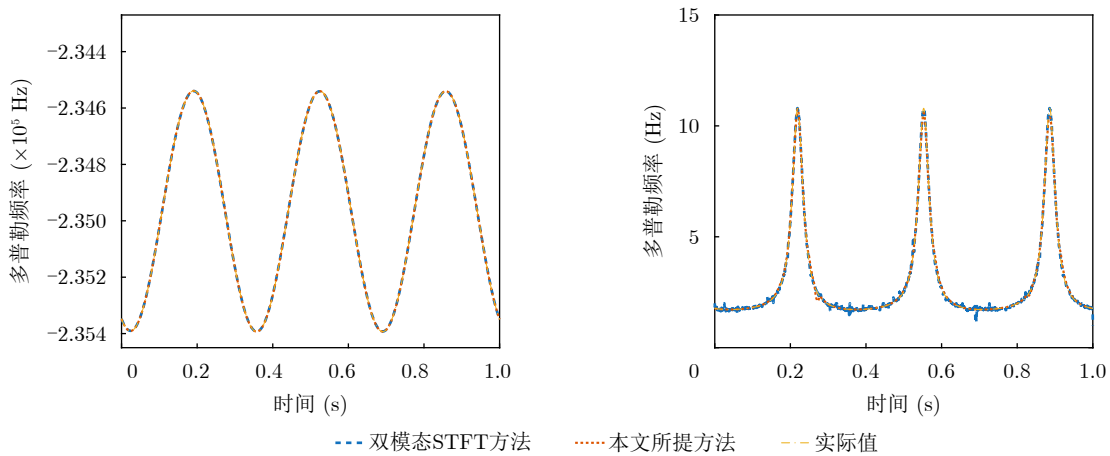


图10 两种方法估计出的总体多普勒频率

Fig. 10 Total Doppler frequency curves estimated by two methods



(a) 解模糊后的径向多普勒频率曲线

(b) 提取出的旋转多普勒频率曲线

(a) Radial Doppler frequency curve after ambiguity resolution

(b) Extracted rotational Doppler frequency curve

图11 径向多普勒、旋转多普勒频率曲线估计结果

Fig. 11 Estimation results of radial Doppler and rotational Doppler frequency curves

拉角、旋转中心、旋转半径、平动速度、旋转频率参数。

根据表3中的估计结果表明，相比于双模态STFT方法的估计结果，基于本文所提方法分离的径向多普勒与旋转多普勒频率值，5个参数的估计值均更接近真值。相较于表3的前3个参数，后2个运动参数的估计误差较小，这因为平动速度和旋转频率的精度仅取决于径向多普勒频率的估计精度，而欧拉角、旋转中心、旋转半径的精度与旋转多普勒频率的估计精度紧密相关，旋转多普勒的估计误差通常比径向多普勒估计误差大。综上所述，本文方法在仅利用发射单模态涡旋电磁波条件下，参数估计精度优于双模态STFT方法，验证了其在运动参数估计中的有效性与可靠性。

考虑目标上存在多个散射点的情况。假设目标上有2个散射点分别围绕各自旋转中心旋转，在上述仿真的基础上增加一个围绕(0.20 m, 0.30 m, 103 m)旋转的散射点2，目标整体平动速度仍然为(0, 0, 1007 m/s)。基于STFT得到多普勒压缩前后的时频分布如图12所示，由于本文的仿真中采用的等效频率较低，在多普勒压缩后的时频图上多个散射点的时频分布非常集中，如图12(b)所示，难以从时频分布上分辨出多条瞬时频率曲线，因此需

要首先对距离像进行区分，对式(14)距离像中每个散射点所在距离单元进行加窗提取，从而实现每个散射点的分别单独处理，而后变换到式(15)的二维时域，再分别对每一个散射点的瞬时频率进行估计。

得到的径向多普勒、旋转多普勒频率曲线估计结果如图13所示，由于双模态STFT的方法对瞬时频率曲线的提取精度有限，其旋转多普勒估计误差较大，因此这里只展示了所提方法的瞬时频率估计结果和运动参数估计结果。图13结果展示了对于多个散射点回波，所提方法仍然能够较好地估计并分离出每个散射点的径向多普勒和旋转多普勒，但是相比于单散射点情况，多散射点情况下对旋转多普勒频率的估计精度有所下降。

表4中的运动参数估计结果表明，所提方法仍然能够实现对多个散射点运动参数的估计。

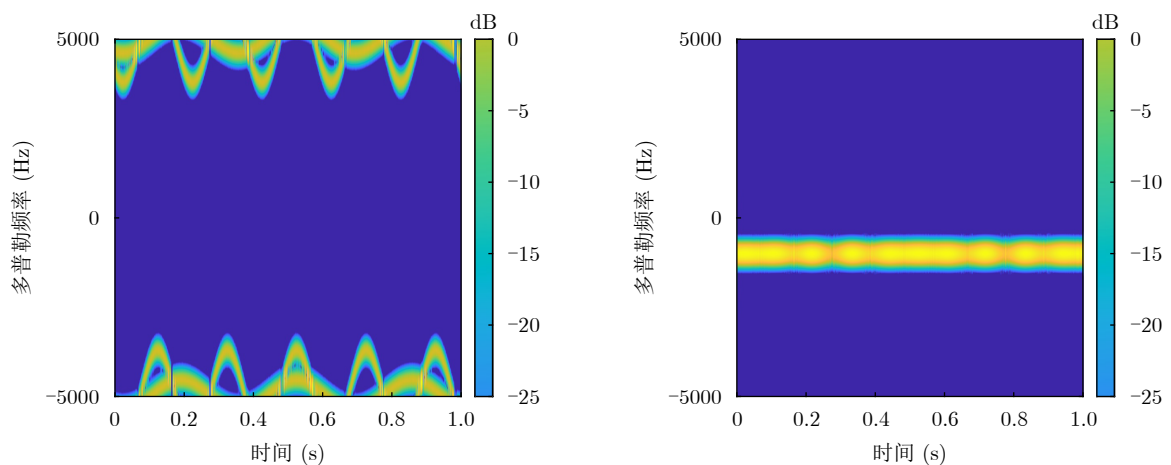
5 结语

针对平动旋转复合运动目标的参数估计问题，本文提出了一种基于单模态涡旋电磁波的径向-旋转多普勒分离与高精度参数估计方法。本文通过对dechirp后回波进行多普勒压缩处理，能够将多普勒频率压缩至无模糊区间，并且仅需要单模态涡旋

表 3 本文所提方法和双模态STFT方法所得运动参数估计结果

Tab. 3 The estimation results of the proposed method and DUAL-OAM STFT method

	欧拉角($^{\circ}$)	旋转中心(m)	旋转半径(m)	平动速度(m/s)	旋转频率(Hz)
真值	(10.0000, 5.0000)	(0.2000, 0.3000)	0.5000	(0, 0, 1007)	3.0000
本文所提方法	(9.7551, 4.5412)	(0.1778, 0.3198)	0.5192	(0, 0, 1007.0087)	2.9986
双模态STFT方法	(11.4207, 4.0481)	(0.1719, 0.2647)	0.4617	(0, 0, 1007.1070)	3.0016



(a) 多普勒压缩前时频分布图
(a) Time-frequency diagram before Doppler compression

(b) 多普勒压缩后时频分布图
(b) Time-frequency diagram after Doppler compression

图 12 多普勒压缩前后时频分布图(2散射点)

Fig. 12 Time-frequency diagram before and after Doppler compression (2 scatters)

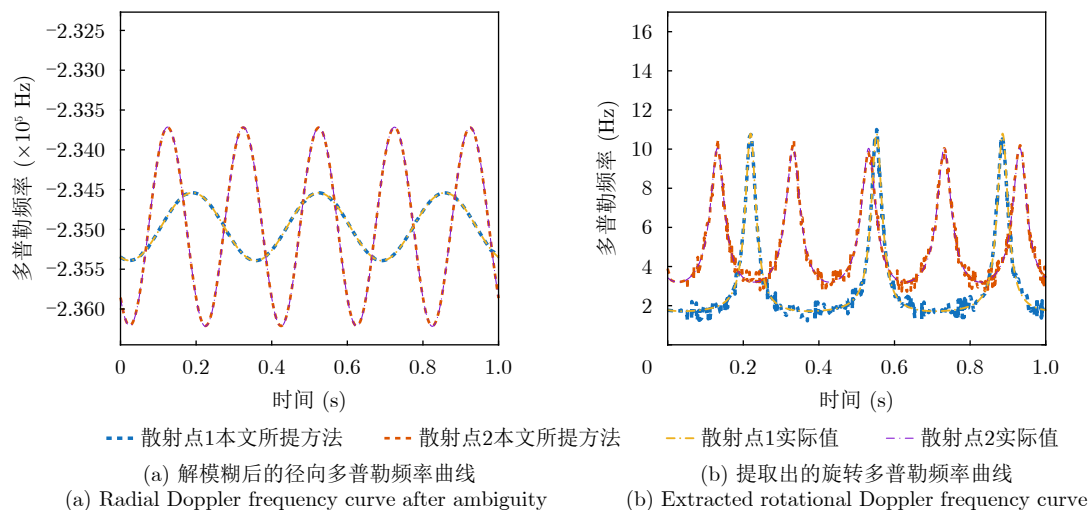


图 13 径向多普勒、旋转多普勒频率曲线估计结果(2散射点)
Fig. 13 Estimation results of radial Doppler and rotational Doppler frequency curves (2 scatterers)

表 4 两散射点目标运动参数估计结果

Tab. 4 The estimation results of the target with two scatterers

散射点	类型	欧拉角($^{\circ}$)	旋转中心(m)	旋转半径(m)	平动速度(m/s)	旋转频率(Hz)
1	真值	(10.0000, 5.0000)	(0.2000, 0.3000)	0.5000	(0, 0, 1007)	3.0000
	所提方法估计值	(7.2537, 7.0008)	(0.2179, 0.3313)	0.5540	(0, 0, 1006.9648)	2.9986
2	真值	(10.0000, 10.0000)	(0.2000, 0.3000)	0.7000	(0, 0, 1007)	5.0000
	所提方法估计值	(9.4331, 12.1597)	(0.1719, 0.2647)	0.6446	(0, 0, 1006.9642)	4.9869

电磁波即可实现径向多普勒与旋转多普勒的有效分离。通过对压缩后回波和原始回波采用APWSR瞬时频率估计方法进行频率估计,可获得无模糊、高精度的径向多普勒与旋转多普勒曲线。在此基础上,实现了目标平动速度、旋转半径、旋转频率以及欧拉角等运动参数的准确提取。仿真实验验证了所提方法的有效性与稳健性,结果表明,所提方法在仅利用单模态回波的情况下,对目标运动参数估计精度均优于已有双模态方法。未来的工作将主要集中在探索所提方法的参数设置标准以及如何提高计算效率等方面。

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] 陈小龙, 何肖阳, 邓振华, 等. 雷达微弱目标智能化处理技术与应用[J]. 雷达学报(中英文), 2024, 13(3): 501–524. doi: 10.12000/JR23160.
CHEN Xiaolong, HE Xiaoyang, DENG Zhenhua, *et al.* Radar intelligent processing technology and application for weak target[J]. *Journal of Radars*, 2024, 13(3): 501–524. doi: 10.12000/JR23160.
- [2] 陈小龙, 关键, 何友. 微多普勒理论在海面目标检测中的应用及展望[J]. 雷达学报, 2013, 2(1): 123–134. doi: 10.3724/SP.J.1300.2013.20102.
CHEN Xiaolong, GUAN Jian, and HE You. Applications and prospect of micro-motion theory in the detection of sea surface target[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(1): 123–134. doi: 10.3724/SP.J.1300.2013.20102.
- [3] 杨琪, 邓彬, 王宏强, 等. 太赫兹雷达目标微动特征提取研究进展[J]. 雷达学报, 2018, 7(1): 22–45. doi: 10.12000/JR17087.
YANG Qi, DENG Bin, WANG Hongqiang, *et al.* Advancements in research on micro-motion feature extraction in the terahertz region[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(1): 22–45. doi: 10.12000/JR17087.
- [4] BAI Xueru, HUI Ye, WANG Li, *et al.* Radar-based human gait recognition using dual-channel deep convolutional neural network[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(12): 9767–9778. doi: 10.1109/TGRS.2019.2929096.
- [5] 张群, 胡健, 罗迎, 等. 微动目标雷达特征提取、成像与识别研究进展[J]. 雷达学报, 2018, 7(5): 531–547. doi: 10.12000/JR18049.
ZHANG Qun, HU Jian, LUO Ying, *et al.* Research progresses in radar feature extraction, imaging, and recognition of target with micro-motions[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(5): 531–547. doi: 10.12000/JR18049.

- [6] TIAN Xudong, BAI Xueru, and ZHOU Feng. Recognition of micro-motion space targets based on attention-augmented cross-modal feature fusion recognition network[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5104909. doi: [10.1109/TGRS.2023.3275991](https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3275991).
- [7] ZHOU Xuening, BAI Xueru, WANG Li, *et al.* Robust ISAR target recognition based on ADRISAR-net[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, 58(6): 5494–5505. doi: [10.1109/TAES.2022.3174826](https://doi.org/10.1109/TAES.2022.3174826).
- [8] YANG Zheng, CHENG Yongqiang, WU Hao, *et al.* Enhanced matrix information geometry detection for weak targets in heterogeneous clutter environment[J]. *Science China Information Sciences*, 2025, 68(11): 219301. doi: [10.1007/s11432-024-4556-9](https://doi.org/10.1007/s11432-024-4556-9).
- [9] 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).
- [10] LIU Kang, LIU Hongyan, LI Shuangxun, *et al.* Three-dimensional object imaging with vortex wave tomography[J]. *Optics Express*, 2025, 33(10): 20798–20806. doi: [10.1364/OE.563860](https://doi.org/10.1364/OE.563860).
- [11] COURTIAL J, DHOLAKIA K, ROBERTSON D A, *et al.* Measurement of the rotational frequency shift imparted to a rotating light beam possessing orbital angular momentum[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 80(15): 3217–3219. doi: [10.1103/PhysRevLett.80.3217](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.80.3217).
- [12] 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).
- [13] ZHAO Mingyang, GAO Xinlu, XIE Mutong, *et al.* Measurement of the rotational doppler frequency shift of a spinning object using a radio frequency orbital angular momentum beam[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2549–2552. doi: [10.1364/OL.41.002549](https://doi.org/10.1364/OL.41.002549).
- [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](https://doi.org/10.1109/MVT.2018.2890673).
- [15] LIU Kang, CHENG Yongqiang, LI Xiang, *et al.* Passive OAM-based radar imaging with single-in-multiple-out mode[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2018, 28(9): 840–842. doi: [10.1109/LMWC.2018.2852146](https://doi.org/10.1109/LMWC.2018.2852146).
- [16] LUO Ying, CHEN Yijun, ZHU Yongzhong, *et al.* Doppler effect and micro-Doppler effect of vortex-electromagnetic-wave-based radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2020, 14(1): 2–9. doi: [10.1049/iet-rsn.2019.0124](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2019.0124).
- [17] 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).
- [18] 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).
- [19] 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).
- [20] 袁航, 何其芳, 罗迎, 等. 涡旋电磁波雷达平动旋转目标三维微动参数提取方法[J]. *雷达学报*, 2023, 12(4): 804–816. doi: [10.12000/JR23065](https://doi.org/10.12000/JR23065).
YUAN Hang, HE Qifang, LUO Ying, *et al.* Three-dimensional micro-motion parameters extraction of translational rotating targets based on vortex electromagnetic wave radar[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(4): 804–816. doi: [10.12000/JR23065](https://doi.org/10.12000/JR23065).
- [21] 罗迎, 袁航, 袁延鑫. 单频涡旋电磁波雷达旋转目标微动参数提取方法[J]. *信号处理*, 2023, 39(9): 1587–1595. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2023.09.005](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2023.09.005).
LUO Ying, YUAN Hang, and YUAN Yanxin. A method for micro-motion parameters extraction of rotating targets based on single-frequency vortex electromagnetic wave radar[J]. *Journal of Signal Processing*, 2023, 39(9): 1587–1595. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2023.09.005](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2023.09.005).
- [22] YUAN Tiezhu, CHENG Yongqiang, WANG Hongqiang, *et al.* Beam steering for electromagnetic vortex imaging using uniform circular arrays[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 704–707. doi: [10.1109/LAWP.2016.2600404](https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2600404).
- [23] ZHONG Jingang and HUANG Yu. Time-frequency representation based on an adaptive short-time fourier transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(10): 5118–5128. doi: [10.1109/TSP.2010.2053028](https://doi.org/10.1109/TSP.2010.2053028).
- [24] PEI S C and HUANG S G. STFT with adaptive window width based on the chirp rate[J]. *IEEE Transactions on*

- Signal Processing*, 2012, 60(8): 4065–4080. doi: [10.1109/TSP.2012.2197204](https://doi.org/10.1109/TSP.2012.2197204).
- [25] ABATZOGLOU T J. Fast maximum likelihood joint estimation of frequency and frequency rate[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1986, AES-22(6): 708–715. doi: [10.1109/TAES.1986.310805](https://doi.org/10.1109/TAES.1986.310805).
- [26] O'SHEA P. A fast algorithm for estimating the parameters of a quadratic FM signal[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(2): 385–393. doi: [10.1109/TSP.2003.S21097](https://doi.org/10.1109/TSP.2003.S21097).
- [27] LIU Zhen, YOU Peng, WEI Xizhang, *et al.* High resolution time-frequency distribution based on short-time sparse representation[J]. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2014, 33(12): 3949–3965. doi: [10.1007/s00034-014-9832-3](https://doi.org/10.1007/s00034-014-9832-3).
- [28] 李康乐. 雷达目标微动特征提取与估计技术研究[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2010.
- LI Kangle. Research on feature extraction and parameters estimation for radar targets with micro-motions[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2010.
- [29] YANG Yang, CHENG Yongqiang, WU Hao, *et al.* Parametric instantaneous frequency estimation via PWSR with adaptive QFM dictionary[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2023, 30: 738–742. doi: [10.1109/LSP.2023.3287129](https://doi.org/10.1109/LSP.2023.3287129).
- [30] TROPP J A and GILBERT A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(12): 4655–4666. doi: [10.1109/TIT.2007.909108](https://doi.org/10.1109/TIT.2007.909108).

作者简介

谭政宽, 博士生, 主要研究方向为电磁涡旋雷达与阵列信号处理。

刘康, 教授, 主要研究方向为雷达超分辨成像、涡旋波雷达技术等。

杨阳, 博士生, 主要研究方向为雷达信号处理与雷达前视成像。

陈雨馨, 博士生, 主要研究方向为雷达信号处理。

刘红彦, 助理研究员, 主要研究方向为电磁涡旋雷达成像技术等。

(责任编辑: 于青)