

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902754

海面舰船目标微多普勒周期快速估计方法*

朱丽军¹ 陈玉坤²

(1. 嘉兴学院 机电工程学院 嘉兴 314000; 2. 洛阳理工学院 洛阳 471023)

摘要:提出一种海面舰船目标微多普勒周期快速估计方法。受海情影响,舰船目标处于微动状态中,导致雷达回波产生微多普勒调制。舰船微多普勒参数与舰船结构、目标动力等密切相关,是舰船目标识别的重要依据。在建立海面舰船目标雷达回波模型的基础上,分析了回波的调制特性,并提出一种微多普勒周期快速估计方法。该方法首先基于最小熵方法实现舰船目标主体平动的补偿,然后根据微多普勒区域与噪声区域的熵差异实现目标多普勒区间定位,最后计算截取区域的时频相关系数实现微多普勒周期的估计。其中微多普勒区间的定位降低了时频相关系数的计算量,使该方法的运算效率相比原有算法有较大的提升。在典型场景和雷达参数下,该方法计算效率获得2.5倍的提升。

关键词: 进动;微多普勒;参数估计

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Fast micro-doppler period estimation method for ship target

Zhu Lijun¹ Chen Yukun²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Jiaxing University, Jiaxing 314000, China;

2. Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: A micro-doppler period estimation method for ship target is proposed. Under the influence of sea conditions, ship targets are in the micro-motion state, which induces micro-doppler modulation on the radar echo. The micro-doppler parameters of the ship target are closely related to ship structure, target dynamics and so on, which is an important basis for ship target recognition. In this paper, based on the radar echo model of ship target, the modulation characteristics are analyzed, and a fast estimation method of micro-Doppler period is proposed. Firstly, the main body translation of ship target is successfully compensated based on the minimum entropy method; then the Doppler range is located according to the entropy difference between the micro-Doppler area and the noise area; finally, the time-frequency correlation coefficient is calculated to provide the micro-Doppler period estimation. The location of micro-doppler range reduces the computation burden of the time-frequency correlation coefficient, which makes it fast compared to the original algorithm. Under the typical scene and radar parameters, the efficiency of the method is improved by 2.5 times.

Keywords: ship target; micro-motion; period estimation

0 引言

雷达作为一种重要的传感器,在目标结构信息获取、目标运动参数测量、目标识别等方面具有重要作用^[1-5]。近年来,雷达微动研究日益受到重视,基于雷达微多普勒特征对目标进行识别是目标识别领域的一个热点^[4-8]。

海面舰船目标识别在军民用领域具有重要的应用价值。使用机载或星载雷达获取舰船目标特征是舰船识别的重要技术途径之一。受海面运动影响,舰船目标发生摆动,产生微多普勒调制^[9-11]。

针对海面微动舰船的研究大部分集中于舰船目标的摆动模型和微多普勒模型,少量文献对舰船目标的微多普勒参数估计进行研究^[9-11]。文献[9-10]建立了舰船的

微多普勒信号模型,指出舰船目标摆动可分解为横滚、俯仰、偏航 3 个运动分量。文献[11]提出一种基于时频相关系数矩阵的微多普勒周期估计方法。目前,微多普勒周期估计方法大致可分为两类,基于微多普勒序列的周期估计和基于时频图变换的周期估计^[12-15]。其中前者要求精确提取目标的微多普勒序列,不适用于散射中心较多的舰船目标^[12];后者则涉及到整个时频图的运算,计算效率较低^[15]。除了利用雷达微多普勒外,基于宽带回波测量序列也可进行微动参数估计^[16-18]。

舰船目标微多普勒特征对其识别具有重要意义。为实现舰船目标微多普勒周期的快速有效估计,本文提出一种基于目标微多普勒区间定位和时频相关系数的微多普勒周期快速估计方法。首先,在计算的时频图基础上使用熵度量函数定位出有效的目标微多普勒区间;在此基础上,基于截取微多普勒区域的时频相关系数,实现微多普勒周期的估计。由于时频相关系数是在截取后的时频图进行,计算的时频区域尺寸大幅减小,获得显著的效率提升。通过仿真实验验证,本文方法能够以较高的运算效率实现舰船目标的微多普勒周期估计,且具有较优的估计性能。

1 海面舰船目标微多普勒信号模型

海面舰船目标的雷达观测几何如图 1 所示,假设目标符合雷达远场观测条件。建立参考坐标系 $O - XYZ$,其中 XOY 平面为海平面。机载雷达以速度 v_p 、高度 h_p 水平飞行,飞行方向为 X 轴方向。以舰船目标微动旋转中心为原定建立固定的参考坐标系 $o - xyz$,其中 oy, ox, oz 分别为舰船目标横滚、俯仰和偏航转动坐标轴,设目标的偏航角为 θ_r 、横滚角为 θ_a 、俯仰角为 θ_p ;舰船做匀速运动,运动速度为 (v_x, v_y) ,雷达的下视角为 β 。

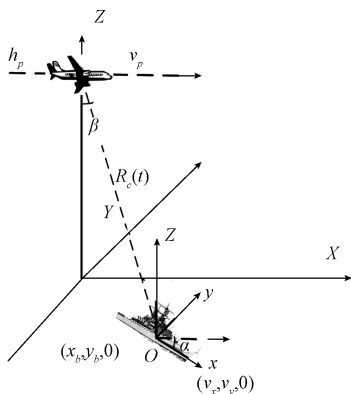


图 1 舰船目标雷达观测几何

Fig. 1 The radar geometry of the ship target

平动和舰船微动两部分。对机载雷达,匀速运动目标与雷达之间的距离可近似为:

$$R_c(t) = R_b + v_r(t - t_b) + \frac{1}{2R_b}v_{rel}^2(t - t_b)^2 \quad (1)$$

其中, $t_b = x_b/v_p$ 为目标处于雷达波束中心的时刻; $R_b = \sqrt{y_b^2 + h_p^2}$ 为 t_b 时刻目标对应的斜距; $v_r = v_y \sin \beta$ 为目标径向速度; $v_{rel} = \sqrt{(v_p - v_x)^2 + v_y^2(1 - \sin^2 \beta)}$ 为等效飞行速度。

舰船摆动可分解为横滚、俯仰、偏航 3 个分量,每一分量可用钟摆模型进行建模^[10]。目标的横滚角、俯仰角和偏航角分别表示为 $\theta_a = A_a \sin(\omega_a t)$ 、 $\theta_p = A_p \sin(\omega_p t)$ 和 $\theta_r = A_r \sin(\omega_r t)$ 。舰船目标散射中心的微动可根据目标本地坐标系到参考坐标系的旋转计算,旋转矩阵为:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_x(\theta_a) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_a & -\sin \theta_a \\ 0 & \sin \theta_a & \cos \theta_a \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_y(\theta_p) &= \begin{bmatrix} \cos \theta_p & 0 & \sin \theta_p \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_p & 0 & \cos \theta_p \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_z(\theta_r) &= \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r & 0 \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

散射中心 (x, y, z) 的时变坐标可表示为:

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \mathbf{R}_x(\theta_a) \times \mathbf{R}_y(\theta_p) \times \mathbf{R}_z(\theta_r) \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3)$$

由舰船目标摆动引起的散射中心与雷达的距离为:

$$R_M(t) = [\cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \cos \beta - \sin \beta] \times \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

综合舰船主体运动和舰船微动,该散射中心与雷达的距离可表示为:

$$R(t) = R_c(t) + R_M(t) \quad (5)$$

设舰船目标散射中心数量为 L , 舰船目标的基频回波为:

$$s(t) = \sum_{l=1}^L \sigma_l \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} R_l(t) \right\} \quad (6)$$

式中: σ_l 为第 l 个散射中心的强度; λ 为雷达发射信号波长。第 l 个散射中心的瞬时多普勒定义为:

$$f_l(t) = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR_l(t)}{dt} \quad (7)$$

进一步,可将目标微多普勒分解成舰船主体运动引起的多普勒与舰船摆动引起的微多普勒两部分:

$$f_l(t) = f_c(t) + f_m(t) \quad (8)$$

考虑舰船上的散射中心,其运动可分解为舰船主体

通常情况下,由于舰船的动力控制及结构因素,舰船的横滚在舰船摆动中占主导作用,其微多普勒主要取决于舰船横滚,微多普勒周期可近似为舰船横滚周期。

$$f_M(t) = f_m(t + T_a) \quad (9)$$

其中, $T_a = \frac{2\pi}{\omega_a}$ 为微多普勒周期。

2 微多普勒周期快速估计方法

舰船目标的瞬时多普勒是时变的,传统信号分析方法-傅里叶变换无法有效进行分析,需要采用同时具有时间-频率分辨能力的数学工具。时频分析方法可同时提供时间和频率二维信息,是分析舰船目标雷达信号的重要数学工具。此处采用计算简便的短时傅里叶变换(STFT)获取舰船的时间-频率信息。对信号 $s(t)$, 其短时傅里叶变换的计算方法为:

$$\rho(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) h(\tau - t) \exp(-j2\pi f \tau) d\tau \quad (10)$$

2.1 舰船回波平动补偿

根据舰船信号模型,机载雷达、舰船的主体运动也会产生多普勒调制,其调制特征与微多普勒调制特征差异较大,限制了微多普勒周期的估计。因此,需先对舰船回波进行运动补偿,去除平动影响。已有研究表明,平动引起的多普勒调制会增加微动信号回波的频谱区间,使熵增大^[19]。可在频域考察信号,观测补偿前后信号频谱熵的变化,当平动被去除时,信号的频谱熵最小。因此,基于频谱熵可实现对舰船回波的平动补偿。构造二次相位信号补偿舰船目标回波的线性平动多普勒项,补偿信号为:

$$s_q(t) = \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda R_b} R_b v_c^2 t\right\} \quad (11)$$

补偿后的舰船回波信号为:

$$s_c(t) = s(t) \cdot s_q(t) \quad (12)$$

其中, v_c 为补偿平动速度,可在 v_p 周围对速度进行搜索,选择补偿后回波频谱熵最小对应的速度作为补偿速度。补偿过程可描述为:

$$\hat{v}_c = \operatorname{argmin}_{v_c} \varepsilon(s_c, v_c) \quad (13)$$

其中:

$$\varepsilon(s_c, v_c) = - \int_{-\infty}^{\infty} |S_c(f)|^2 \ln |S_c(f)|^2 df \quad (14)$$

$$S_c(f) = F[s_c(t)] \quad (15)$$

式中: $\varepsilon(s_c, v_c)$ 为 $s_c(t)$ 的频谱熵; $S_c(f)$ 为 $s_c(t)$ 的傅里叶变换; $F[\]$ 为傅里叶变换算子。在此基础上,估计舰船目标径向运动速度,去除时频图的整体偏移项。

$$\hat{v}_r = \frac{f_{\max} \lambda}{2} \quad (16)$$

$$f_{\max} = \operatorname{argmax}_f |S_c(f)|_{v_c = \hat{v}_c} \quad (17)$$

补偿后的信号表示为:

$$\hat{s}_c(t) = s(t) \cdot \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda R_b} R_b \hat{v}_c^2 t + j \frac{4\pi}{\lambda} \hat{v}_r t\right\} \quad (18)$$

2.2 微多普勒区间定位

补偿后的舰船回波信号时频图的线性项得以去除,目标能量集中在以零为中心的一段频率区间内。雷达脉冲重复频率一般大于目标微多普勒范围,该区间范围小于时频图的频率测量范围。在利用时频图估计目标微多普勒周期时,可截取该区间,降低计算量。基于此,本文首先对该区间进行定位,然后再估计微多普勒周期。

观察到该区间之外的区域为噪声区域,与目标微多普勒区域的能量分布特性具有明显差异,可使用能量分布函数进行描述^[20]。

为了去除时频图能量绝对值的影响,对时频图进行归一化:

$$\rho'_c(t, f) = \frac{\rho_c(t, f)}{\sum_i \rho_c(t, f)} \quad (19)$$

计算每个多普勒单元的熵值

$$H(f) = - \sum_i \rho'_M(t, f) \log \rho'_M(t, f) \quad (20)$$

微多普勒区间具有较小的熵值,噪声区域的熵值则较大,根据两者差异可定位出目标微多普勒区间,实现时频图的分割。

2.3 基于时频相关系数微动周期估计

根据文献[13]可知,微动信号回波的时频分布存在周期性,具体体现为某一瞬时时刻的频谱内容以微动周期为间隔周期重复出现。补偿后的舰船回波信号时频分布具有周期性,易得:

$$\rho_c(t, f) = \rho_c(t + T_a, f) \quad (21)$$

时频相关系数涉及到所有瞬时时刻频谱的相关度计算,计算量较大。通过两个途径来降低其计算量,提高计算效率。一是基于微多普勒区间截取目标时频区域,二是在时间维度对时频进行降采样。

通过如下步骤估计舰船回波的时频相关系数。

1) 计算任意两个瞬时时刻的时频相关系数:

$$C_r(k; n, l) = \sum_{m=0}^{M-1} |\rho(n, m)| |\rho(l, (k+m)_M)| \quad (22)$$

2) 对 $C_r(n, l)$ 进行归一化,并堆砌成时频相关系数矩阵:

$$\mathbf{M}_c = \begin{bmatrix} C_m(0,0) & C_m(0,1) & \cdots & C_m(0,N-1) \\ C_m(1,0) & C_m(1,1) & \cdots & C_m(1,N-1) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ C_m(N-1,0) & C_m(N-1,1) & \cdots & C_m(N-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (23)$$

其中, $C_m(n, l)$ 为归一化后相关系数。

$$C_m(n, l) = \frac{\max_k \{ C_r(k; n, l) \}}{\sqrt{\sum_{m=0}^{M-1} |\rho(n, m)|^2} \sqrt{\sum_{m=0}^{M-1} |\rho(l, m)|^2}} \quad (24)$$

3) 计算平均时频相关系数。

$$\bar{C}_r(k) = \text{mean} \{ \text{diag}(\mathbf{M}_c, k) \} \quad (25)$$

2.4 实现步骤

微动周期估计流程如图 2 所示, 具体步骤如下: 1) 最小熵平动补偿; 2) 计算时频分析; 3) 微多普勒区间定位; 4) 时频区域截取与降采样; 5) 计算时频相关系数; 6) 进行峰值检测, 峰值位置为微动周期估计。

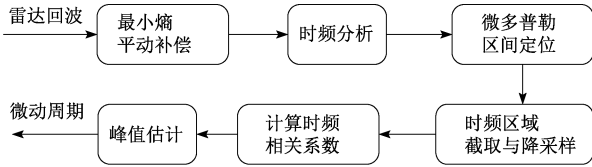


图 2 微动周期估计流程

Fig. 2 The flow of micro-motion period estimation

3 实验与分析

采用等效散射中心建模舰船, 各散射中心坐标为 $(-30.5, 0)$ 、 $(30.5, 0)$ 、 $(-20.3, -10)$ 、 $(-20.3, 10)$ 、 $(20.3, -10)$ 、 $(20.3, 10)$ 、 $(0, -10)$ 、 $(0, 10)$ 。舰船回波的仿真流程如图 3 所示。首先根据运动模型分别计算舰船平动和微动距离, 然后由式(6)生成雷达回波, 最后在雷达回波中注入噪声。

雷达发射单频信号, 中心频率为 10 GHz, 雷达回波的采样频率为 500 Hz。舰船横滚幅度为 18.6° , 周期为 10 s, 偏航幅度为 1.8° , 周期为 14.2 s, 俯仰幅度为

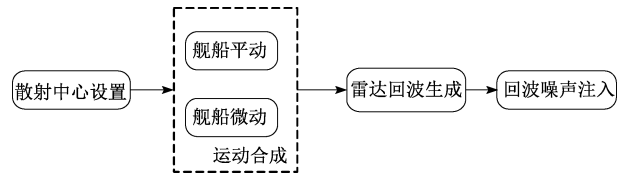
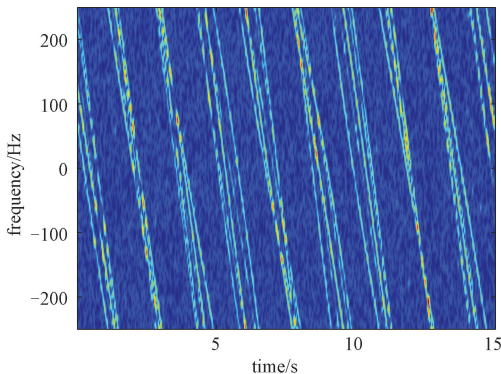


图 3 舰船目标雷达回波仿真流程

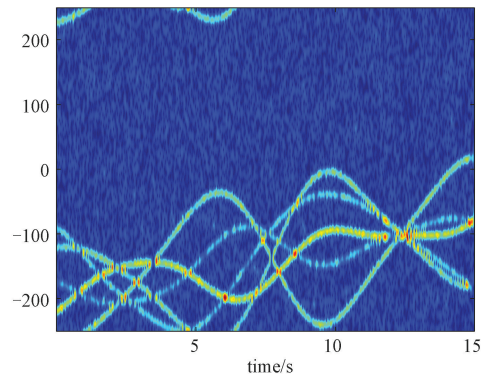
Fig. 3 The flow of radar echo generation for ship

1.65° , 周期为 6.7 s; 横向运动速度为 2.5 m/s, 纵向运动速度为 3.0 m/s。回波信噪比为 $SNR = 5$ dB。机载雷达平台在 6 km 飞行高度以 200 m/s 的速度水平飞行。

舰船回波的处理结果如图 4 所示。图 4(a) 为舰船回波的原始时频分布, 本文使用的时频分布为短时傅里叶变换。由于舰船平动的存在, 且其引起的多普勒超出雷达脉冲重复频率, 原始时频分布出现多普勒模糊现象, 从中无法观测到舰船微动。图 4(b) 为使用机载雷达飞行速度进行运动补偿后的时频分布, 由于补偿与目标实际平动不一致, 此时仍有残余平动, 说明直接基于飞行速度进行运动补偿无法彻底去除目标平动影响。图 4(c) 给出最小熵平动补偿后的时频分布, 回波的平动被成功补偿, 时频分布不存在趋势项, 从时频图中可明显观察到舰船微动导致的微多普勒。图 4(d) 为各频率单元的熵值和微多普勒区间定位结果 (红色方框部分), 微多普勒区间的熵明显低于噪声区域的熵。图 4(e) 为截取的时频分布, 舰船目标的微多普勒被有效截取。图 4(f) 为基于截取和降采样的时频分布计算的时频相关系数, 其中降采样倍数为 10, 时频相关系数在 $-9.98, 0, 9.98$ s 出现峰值, 据峰值间隔计算出舰船微多普勒周期估计为 9.98 s, 接近舰船的横滚周期 10 s。分析可知, 舰船目标的横滚较其他方向的运动分量更为剧烈, 舰船微动由横滚主导, 因此微动 (微多普勒) 周期近似为横滚周期。本文提出的估计方法可有效估计出舰船的微多普勒周期。



(a) 原始时频分布
(a) The original TFD



(b) 使用飞行速度补偿后的时频分布
(b) The TFD after compensation with flight velocity

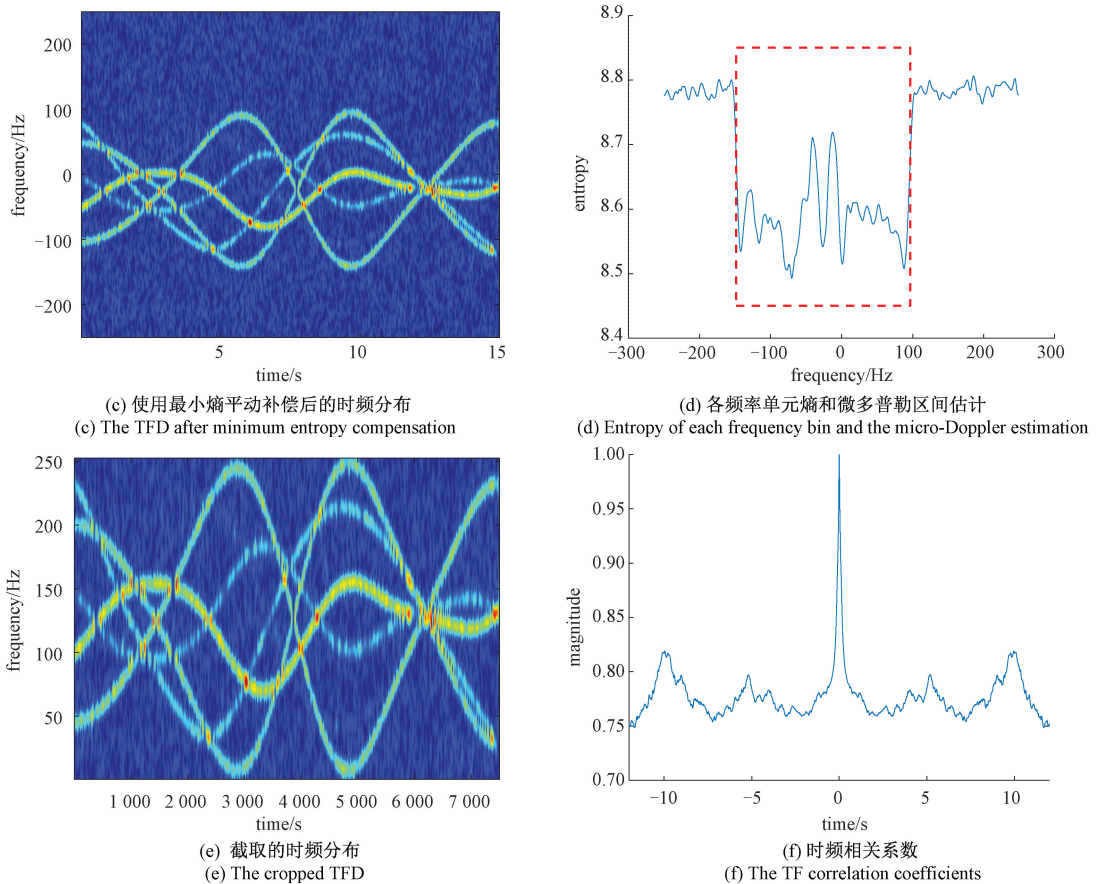


图4 舰船回波处理结果

Fig. 4 The processing result of the ship echo

为了分析方法的计算性能,在 MATLAB 运行环境中,对只进行降采样的时频计算相关系数(文献[11])、本文方法的运行时间进行评估,硬件条件为 Intel i7-4712 MQ CPU 2.30 GHz,两者的运行时间分别为 4.86、1.94 s,相比已有方法,本文计算效率提升 2.5 倍。

4 结论

本文提出了海面舰船目标微多普勒周期快速估计方法,建立了机载雷达舰船目标的雷达回波模型,分析了其调制特性,基于熵度量函数对微多普勒区间进行定位,根据定位结果截取目标时频,最后计算时频相关系数实现微多普勒周期估计。由于时频相关系数具有良好的性能,且其计算只在截取的区域进行,本文所提方法具有良好的估计性能,计算效率得到大幅提升。在典型场景和雷达参数的仿真实验表明,该方法可准确快速估计出微多普勒周期,估计误差为 0.02 s,估计参数所需运行时间为 1.94 s。

参考文献

- [1] LEI P, WANG J, SUN J. Analysis of radar micro-Doppler signatures from rigid targets in space based on inertial parameters. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2011, 5(2): 93-102.
- [2] 杨季三, 徐贵力, 董文德, 等. 微波叶尖间隙传感器信号校准研究[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(10): 193-201.
YANG J S, XU G L, DONG W D, et al. Study on the signal calibration of microwave blade tip clearance sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(10): 193-201.
- [3] 陈惠红, 刘世明. 基于多重集典型相关的深度特征融合及 SAR 目标识别方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(9): 57-63.
CHEN H H LIU SH M. Fusion of deep features via multiset canonical correlations analysis with application to SAR target recognition [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(9): 57-63.
- [4] 韩勋, 杜兰, 刘宏伟, 等. 基于时频分布的空间锥体目标微动形式分类[J]. *系统工程与电子技术*,

- 2013, 35(4): 684-691.
- HAN X, DU L, LIU H W, et al. Classification of micro-motion form of space cone-shaped object based on time-frequency distribution [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(4): 684-691.
- [5] 李康乐. 雷达目标微动特征提取与估计技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2010.
- LI K L. Research on feature extraction and parameters estimation for radar targets with micro-motions [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [6] TEKELI B, GURBUZ S Z, YUKSEL M, et al. Classification of human micro-doppler in a radar network [C]. 2013 IEEE Radar Conference (RADAR), 2013.
- [7] 李晋, 皮亦鸣, 杨晓波. 基于微动特征提取的太赫兹雷达目标检测算法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2010, 24(9): 803-807.
- LI J, PI Y M, YANG X B. Research on terahertz radar target detection algorithm based on the extraction of micro motion feature [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2010, 24(9): 803-807.
- [8] 何炜琨, 郭双双, 王晓亮, 等. 基于奇异值分解的风电场杂波微动特征提取[J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(4): 588-595.
- HE W K, GUO SH SH, WANG X L, WU R B. Micro-motion features extraction of wind farm echoes based on singular value decomposition [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2017, 31(4): 588-595.
- [9] 陈小龙, 董云龙, 李秀友, 等. 海面刚体目标微动特征建模及特性分析[J]. *雷达学报*, 2015, 4(6): 630-638.
- CHEN X L, DONG Y L, LI X Y, GUAN J. Modeling of Micromotion and Analysis of Properties of Rigid Marine Targets [J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(6): 630-638.
- [10] 杜琳琳, 任艳, 陈曾平. 舰船目标 ISAR 成像多普勒特性分析[J]. *信号处理*, 2009, 25(8A): 549-553.
- DU L L, REN Y, CHEN Z P. Analysis of Doppler characteristics in ship target ISAR imaging [J]. *Signal Processing*, 2009, 25(8A): 549-553.
- [11] 杨秋, 张群, 吴勇, 等. 海面运动舰船微动特征分析与参数估计方法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2015, 42(5): 200-206.
- YANG Q, ZHANG Q, WU Y, et al. Micro-motion feature analysis and parameter estimation methods for moving ship [J]. *Journal of Xidian University (Natural Science)*, 2015, 42(5): 200-206.
- [12] ZHANG W P, LI K L, JIANG W D. Micro-motion frequency estimation of radar targets with complicated translations [J]. *Elsevier AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2015, 69(6): 903-914.
- [13] ZHANG W P, LI K L, JIANG W D. Parameter estimation of radar targets with macro-motion and micro-motion based on circular correlation coefficients [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(5): 633-637.
- [14] 李彦兵, 张曦文, 李飞, 等. 一种大加速度机动目标微动参数估计方法[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(1): 82-87.
- LI Y B, ZHANG X W, LI F, et al. Estimation of micro-motion feature for large accelerated target [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(1): 82-87.
- [15] 夏赛强, 向龙, 朱名烁, 等. 一种变步长的微动目标参数高精度提取方法[J]. *雷达科学与技术*, 2019, 17(5): 506-512.
- XIA S Q, XIANG L, ZHU M SH, et al. A variable-step high accuracy extraction algorithm for micro-motion target parameters [J]. *Radar Science and Technology*, 2019, 17(5): 506-512.
- [16] 李昌利, 胡丽娜. SAR 微动目标检测及其参数估计方法[J]. *雷达科学与技术*, 2019, 17(4): 365-370.
- LI CH L, HU L N. An algorithm for micro motion target detection and parameter estimation for synthetic aperture radar [J]. *Radar Science and Technology*, 2019, 17(4): 365-370.
- [17] 苏楠, 戴奉周, 刘宏伟. 基于 HRRP 序列的钝头倒角锥目标微动特性分析及参数估计[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(7): 1751-1757.
- SU N, DAI F ZH, LIU H W. Micro-motion characteristic analysis and parameters estimation for blunt-nosed chamfered cone based on HRRP sequence [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2019, 41(7): 1751-1757.
- [18] 王超, 叶春茂, 文树梁. 低重频宽带雷达中小幅微动目标的周期估计[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, 40(9): 54-61.
- WANG CH, YE CH M, WEN SH L. Micro-motion period estimation for targets with small LOS change in low PRF broadband radar [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(9): 54-61.
- [19] YU W, WANG J. Phase adjustment for extraction of micro-motion information of ballistic targets [C]. 2012 5th International Congress on Image and Signal Processing (CISP), 2012: 1837-1840.
- [20] LEI P, WANG J, GUO P, et al. Automatic classification of radar targets with micro-motions using entropy segmentation and time-frequency features [J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2011, 65(10): 806-813.

作者简介



朱丽军, 2005 年于宁波大学获得学士学位, 2008 年于宁波大学获得硕士学位, 现为嘉兴学院讲师, 主要研究方向为电子系统设计、智能系统算法与仿真。

E-mail: z515j5@zjxu.edu.cn

Zhu Lijun received his B. Sc. degree from Ningbo University in 2005, M. Sc. degree from Ningbo University in 2008. Now he is a lecturer at Jiaxing University. His main research interests include electronic system design, intelligent system algorithm and simulation.