

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003145

# 一种复合微动空间目标窄带成像方法\*

侯艳斐

(吕梁学院 吕梁 033000)

**摘要:**提出一种复合微动空间目标窄带成像方法。由于窄带雷达在目标检测和跟踪等方面的优势,窄带雷达被广泛用于空间目标探测中。对空间微动目标,微动产生时变多普勒调制,蕴含了目标的重要结构信息,通过对时频图像应用逆约旦变换方法可获取目标各散射点的位置,实现窄带成像。窄带成像降低了对雷达带宽的要求,在空间目标探测上具有优势。然而,在实际探测场景中,目标运动表现为微动和平动的复合叠加,使窄带成像方法失效。在建立复合微动空间目标雷达回波模型的基础上,分析目标的时变多普勒调制特性,提出一种复合微动窄带成像方法,该方法首先基于时频相关系数估计微动周期,利用多普勒相消方法去除平动影响,估计目标平动参数,进而实现平动补偿,最后基于逆约旦变换方法实现窄带成像。所提方法不受目标平动影响,能有效实现复合微动空间目标的窄带成像。

**关键词:**复合微动;空间目标;窄带成像

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

## Narrow-band imaging method for compound micro-motion space target

Hou Yanfei

(Luliang University, Lvliang 033000, China)

**Abstract:** A narrow-band imaging method for space target with compound micro-motion is proposed. Due to the advantages of narrow-band radar in target detection and tracking, narrow-band radar is widely used in space target detection. For space target with micro-motion, there is time-varying Doppler modulation induced by micro-motion, which contains the important structural information of the target. By applying the inverse Radon transform (IRT) method on the time-frequency image, the position of scattering centers of the target can be obtained and the narrow-band imaging can be achieved. Narrow-band imaging reduces the requirement of radar bandwidth and has advantages in space target detection. However, in the real detection scene, the target motion is composed of micro-motion and translation, which makes the narrow-band imaging method invalid. In this paper, based on the radar echo model of space target with compound micro-motion, the time-varying Doppler modulation characteristics of the target are analyzed, and a narrow-band imaging method for compound micro-motion is proposed. Firstly, the micro-motion period is estimated based on the time-frequency correlation coefficient. Then the translational influence is removed by the Doppler cancellation method, the target translational parameters are estimated, and then the translational compensation is achieved. Finally, the narrow-band imaging is achieved based on the IRT. The proposed method is not affected by the target translation, and can effectively achieve the narrow-band imaging for space target with compound micro-motion.

**Keywords:** compound micro-motion; space target; narrow-band imaging

## 0 引言

雷达成像是雷达探测的重要技术之一,可获取目标的结构信息,对目标识别具有重要意义。逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)通过发射宽带信号实现目标距离分辨,联合目标运动产生的多普勒信息实现方位分辨,最终实现目标的二维成像<sup>[1-2]</sup>。受发射信号带宽限制,窄带雷达的距离分辨率有限,无法获取 ISAR 图像,需要探索其他成像方法。

对空间目标,如导弹,其在运动过程中需要保持姿态稳定,因此具有自旋、进动等微动现象。目标微动与目标结构、受力等密切相关,在雷达回波上施加了时变多普勒调制,称为微多普勒效应。雷达目标微动特征具有独特性,可用作鉴别目标的重要依据,在目标探测、识别领域中得到了广泛的应用<sup>[3-5]</sup>。

从雷达微动概念提出至今,研究者提出了大量的雷达微动信号处理方法,主要集中在微动目标回波建模<sup>[4, 6]</sup>、微动特征提取<sup>[7-9]</sup>、微动目标成像<sup>[10-11]</sup>、微动目标识别<sup>[4-5, 12]</sup> 4 个方面。

对简谐形式的微动目标,其时频分布图像表现为多条正弦曲线的叠加,每条曲线对应于一个目标散射点,并受散射点位置调制<sup>[4]</sup>。与 ISAR 成像的转台运动假设不同,目标微多普勒与散射点的二维位置相关,依据微多普勒可反演目标结构,实现目标窄带成像<sup>[10-11]</sup>。

文献[10]提出基于层析投影算法的空间旋转目标窄带成像,通过逆约旦变换(inverse Radon transform, IRT)实现时频分布图像重建目标散射点坐标,实现目标成像。针对飞机旋翼部件成像问题,文献[11]提出基于相干单距离多普勒干涉(CSRDI)算法和主成分分析(PCA)算法的旋翼成像方法,在此基础上提取飞机旋翼参数,并用于飞机目标识别。

微动目标窄带成像的核心在于实现时频分布图像曲线向其参数空间的映射。上述方法均假设目标无平动或者平动得到补偿。另外,为了提升成像效率,窄带成像可在已估计出微动周期的基础上进行,周期估计成为窄带成像的关键步骤。在实际应用中,空间目标存在平动与微动相耦合的情况,上述方法无法进行有效处理<sup>[8]</sup>。

文献[13]提出一种基于最小熵的微动目标平动补偿方法,能够有效补偿加速运动。针对平动条件下的微动周期估计问题,文献[8]指出微动信号时频分布具有循环周期性,可用时频相关系数提取微动周期;文献[14]则利用高阶差值序列去除目标平动;文献[15]提出基于时频差值平方和序列的微动周期估计方法;文献[16]将 Viterbi 算法与时频差值平方和序列相结合,进一步提升了低信噪比条件下的微动周期估计性能。上述

方法均能够有效处理平动,然而这些方法仅针对参数估计,复合微动条件下的窄带成像问题仍有待进一步演技。

本文针对复合微动空间目标窄带成像问题进行研究,首先使用时频相关系数实现平动条件下的微动周期估计,进而利用微多普勒相消方法去除目标微动影响,提取目标的平动参数并实现平动补偿,最后应用逆约旦变换实现目标窄带成像。仿真实验表明,本文方法能够克服平动影响,实现复合微动空间目标的成像,获取目标的结构特征。

## 1 复合微动空间目标雷达回波模型

以空间锥体目标为研究对象,建立如图 1 所示的观测坐标系, $\theta$  为目标进动角, $\alpha$  为雷达视线与进动轴之间的夹角, $\nu$  为雷达视线在参考坐标系中的方位角。考虑目标进动与平动耦合模型,在光学区,目标可用等效散射中心建模。

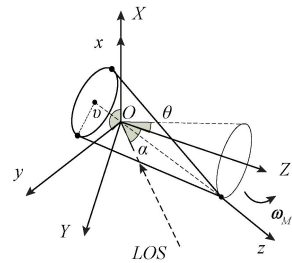


图 1 锥体目标雷达观测几何

Fig. 1 The radar geometry of the cone target

散射中心与雷达之间的距离可表示为:

$$r(t) = r_T(t) + r_M(t) \quad (1)$$

其中  $r_T(t)$  为空间目标整体平动对应的距离,  $r_M(t)$  为散射中心进动对应的距离,根据文献[ ],有:

$$r_M(t) = A_0 \sin(2\pi f_M t + \varphi_0) \quad (2)$$

其中  $A_0 = \sin\alpha \sqrt{x^2 + (y\cos\theta - z\sin\theta)^2}$  为微动幅度,  $\varphi_0 = \text{atan}\left(\frac{xcos\nu + y\sin\nu\cos\theta - z\sin\nu\sin\theta}{x\sin\nu - y\cos\nu\cos\theta - z\cos\nu\sin\theta}\right)$  为初始相位。目标的平动可用 2 阶多项式进行建模,有:

$$r_T(t) = r_0 + vt + \frac{1}{2}at^2 \quad (3)$$

复合微动目标的雷达回波可表示为:

$$s(t) = \exp\left(-\frac{j4\pi r_T(t)}{\lambda}\right) \sum_{l=1}^L \sigma_l(t) \exp\left(-\frac{j4\pi r_l(t)}{\lambda}\right) \quad (4)$$

式中:  $L$  为散射中心数量;  $r_l(t)$ 、 $\sigma_l(t)$  分别为第  $l$  个散射中心的距离和散射强度。第  $l$  个散射中心的瞬时多普勒定义为:

$$f_i(t) = -\frac{2}{\lambda} \frac{dr_T(t)}{dt} - \frac{2}{\lambda} \frac{dr_{m,l}(t)}{dt} \quad (5)$$

式中:  $-\frac{2}{\lambda} \frac{dr_T(t)}{dt}$  为目标整体平动对应的多普勒,  $\frac{2}{\lambda} \frac{dr_{m,l}(t)}{dt}$  微动对应的多普勒。有:

$$f_D = -\frac{2}{\lambda}(v + at) \quad (6)$$

$$f_{mb,l} = -\frac{4\pi f_M}{\lambda} A_l \cos(2\pi f_M t + \varphi_0) \quad (7)$$

从式(2)、(5)可知,微动幅度和相位包含了散射点的坐标信息,可用来反演目标结构。对于窄带雷达,其距离分辨率有限,由微动引起的距离变化小于距离分辨率,因此无法依靠距离测量微动信息。幸运的是,雷达的多普勒分辨率比较高,可由多普勒信息估计目标微动参数,实现目标结构的反演。由于目标平动的影响,各散射点瞬时多普勒为带趋势项的正弦曲线,在进行信号处理时需将该平动补偿掉,方能获取正确的微动信息。

## 2 窄带成像方法

复合微动目标的多普勒随时间变化,时频分析方法能够同时提供时间和频率信息,被广泛用于描述目标的时变多普勒。理想条件下,微动目标的时频分布表现为多条正弦曲线,通过逆约旦变换可实现正弦曲线向其参数空间的变换,所得变换结果能够直接反映目标散射点的位置关系,实现目标的窄带成像。然而,对于复合微动目标,目标平动破坏了微多普勒调制规律,使窄带成像方法失效。因此,需对目标回波进行补偿。

### 2.1 微动周期估计

时频分析能够直观展示雷达信号的时变多普勒信息,是雷达信号分析和特征提取的主要数学工具。短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)具有计算简单、无交叉项等特点<sup>[17-20]</sup>。采用 STFT 变换,雷达回波  $s(t)$  的时频分布为:

$$\rho(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) h(\tau - t) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (8)$$

时频分布采用时间和频率作为自变量,通常显示为图像,因此也常称  $\rho(t, f)$  为时频分布图像或时频图像。

微动目标时频分布图像具有循环相关性,相隔整数倍周期的时频图像切片之间具有频率移位的关系,有:

$$\rho(t, f) = \rho(t + T_a, (f - \Delta f)_{f_p}) \quad (9)$$

其中  $\Delta f$  为  $t + T_a$  与  $t$  时刻目标的平动多普勒差;  $f_p$  为雷达脉冲重复频率。因此,基于时频循环相关系数可实现平动条件下微动周期的估计<sup>[8]</sup>。首先,计算时频相关系数矩阵:

$$\mathbf{M}_c = \begin{bmatrix} C_m(0,0) & C_m(0,1) & \cdots & C_m(0,N-1) \\ C_m(1,0) & C_m(1,1) & \cdots & C_m(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_m(N-1,0) & C_m(N-1,1) & \cdots & C_m(N-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中  $C_m(n, l)$  为相关系数最大值:

$$C_m(n, l) = \frac{\max_k \left\{ \sum_{m=0}^{M-1} |\rho(n, m)| |\rho(l, (k+m)_M)| \right\}}{\sqrt{\sum_{m=0}^{M-1} |\rho(n, m)|^2} \sqrt{\sum_{m=0}^{M-1} |\rho(l, m)|^2}} \quad (11)$$

时频相关系数矩阵同一对角上的元素具有相同时延,对同一对角上的值进行平均可得平均时频相关系数

$$\bar{C}_r(k) = \text{mean} \{ \text{diag}(\mathbf{M}_c, k) \} \quad (12)$$

当  $k$  为目标微动周期的整数倍时,平均相关系数出现峰值,可由其位置估计周期。

### 2.2 平动参数估计与补偿

文献[14]通过高阶差值序列实现平动的消除,事实上,若差值序列的时延等于目标的微动周期时,由于各散射中心相邻周期的微多普勒具有一致性,可达到平动多普勒相消的效果。对于包含多散射点的目标,可通过提取各时刻时频的多普勒频率峰值,记为  $\hat{f}_m(t)$ , 之后进行差值运算去除微动影响,获得平动参数的估计。通过时频相关系数我们已经获得了微动周期估计值,设为  $\hat{T}_M$ , 以其为差值序列时延,多普勒频率峰值的 1 阶差值序列为:

$$D(f, t) = \hat{f}_m(t + \hat{T}_M) - \hat{f}_m(t) = \hat{a}_0 + n \quad (13)$$

其中  $\hat{a}_0 = -\frac{2aT_M}{\lambda}$ 。由于多普勒频率峰值估计存在误差,  $D(f, t)$  为常数项与误差的叠加,对各时刻的多普勒频率峰值差值进行统计平均估计  $\tilde{a}_0$ , 进一步根据与原平动参数的关系估计目标平动加速度,有:

$$\hat{a} = -\frac{\lambda \tilde{a}_0}{2T_M} \quad (14)$$

基于估计的加速度补偿二阶平动,有:

$$s_{c2}(t) = s(t) \exp\left(j \frac{2\pi \hat{a} t^2}{\lambda}\right) \quad (15)$$

通过能量均衡法估计其频谱中心  $\hat{f}_{Dc}$ , 则目标平动速度估计为:

$$\hat{v} = \frac{\lambda}{2} \hat{f}_{Dc} \quad (16)$$

最后,补偿目标的平动速度,得到:

$$s_c(t) = s_{c2}(t) \exp\left(j \frac{4\pi \hat{v} t}{\lambda}\right) \quad (17)$$

## 2.3 基于 iradon 变换的窄带成像

补偿后的时频分布图像可重写为:

$$\rho_{sc}(f, \theta) = \delta[f - a \cos(\theta + \phi)] \quad (18)$$

其中  $f = n\Delta f$  为频率,  $\theta = 2\pi f_M n \Delta T$  表示横轴,  $a$  和  $\phi$  分别为微动幅度和初始相位。此处采用傅里叶切片法分析  $\rho_{sc}(f, \theta)$  的 iradon 变换。首先对频率变量  $f$  进行傅里叶变换:

$$G(v \cos \theta, v \sin \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_s(f, \theta) e^{-j2\pi f v} dv = e^{-j2\pi a v \cos(\theta + \phi)} \quad (19)$$

在式 (19) 中使用极坐标变换  $k_x = v \cos \theta, k_y = v \sin \theta$  有:

$$G(k_x, k_y) = e^{-j2\pi a(k_x \cos \phi - k_y \sin \phi)} \quad (20)$$

$G(k_x, k_y)$  为标准二维复正弦函数, 对其进行二维逆傅里叶变换有:

$$g(x, y) = \delta(x - a \cos \phi) \cdot \delta(y + a \sin \phi) \quad (21)$$

式中:  $k_x, k_y$  于  $f$  的傅里叶变换变量线性相关, 最后又通过逆傅里叶变换得到变量  $x, y$ , 故可认为  $x, y$  和  $f$  具有同样的采样间隔。将  $x = m\Delta f$  和  $y = m\Delta f$  代入有:

$$g(m, n) = \delta(m - \frac{a}{\Delta f} \cos \phi) \delta(n + \frac{a}{\Delta f} \sin \phi) \quad (22)$$

分析可知, iradon 图像的峰值位置出现在  $(a \cos \phi, -a \sin \phi)$ , 反映了微动目标在二维平面上的分布。

## 2.4 实现步骤

复合微动目标的窄带成像处理流程如图 2 所示, 具体步骤如下: 1) 计算时频分析; 2) 计算时频相关系数, 估计微动周期; 3) 提取时频峰值序列, 计算差值序列, 进行线性拟合, 在估计平动参数的基础上对原始回波进行补偿; 4) 计算补偿后回波时频图像的 iradon 变换。

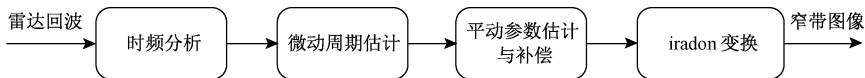


图 2 复合微动目标窄带成像处理流程

Fig. 2 The process flow of narrow-band imaging for compound micro-motion targets

## 3 实验与分析

采用空间目标锥体, 基于 MATLAB 对复合微动目标回波进行仿真和处理。雷达载频为 10 GHz, 脉冲重复频率为 1 024 Hz。目标的高度为 2 m, 锥底半径为 0.2 m, 目标的回波可用顶部和底部边缘的两个散射点进行等效建模, 它们在本体坐标系的位置分别为  $(0, 0, 1.6)$  m,  $(0.2, 0, -0.4)$  m, 对应的散射强度分别为 1、0.8。目标处于进动与平动的复合运动过程中, 进动频率为 2.5 Hz, 进动角为  $10^\circ$ , 雷达视线的平均视界角为  $55^\circ$ , 雷达回波的信噪比为  $SNR = 10$  dB。目标的平动为:

$$r_T(t) = 12t + 1.5t^2 \quad (23)$$

图 3 所示为复合微动空间目标的窄带成像结果。图 3(a) 为目标的时频分布, 可以看出目标有 2 个分量, 它们的瞬时多普勒为带趋势的正弦曲线。图 3(b) 为时频分布的相关系数, 时频相关系数可提取时频分布图的循环周期性, 峰值的平均间隔为 0.200 2 s, 与目标的半周期一致(峰值间隔为半周期是由于目标的对称性导致), 可得目标的微动周期为 0.400 4 s, 周期估计误差为 0.1%。

图 3(c) 基于时频分布图提取的多普勒频率峰值, 计算其差值序列可得图 3(d)。多普勒频率峰值差值序列在 84.4 Hz 上下波动, 据此可估计目标平动加速度为  $3.16 \text{ m/s}^2$ , 与真值基本一致。在此基础上进一步估计目标的平动速度为  $-3.35 \text{ m/s}$ , 与真实速度有 15 m/s 的误

差, 这是由于多普勒模糊产生。该多普勒模糊不影响后续目标窄带成像。

补偿后的目标时频分布如图 3(e) 所示, 可看到补偿后, 目标的时频分布基本无趋势项, 表现为较为纯净的正弦曲线, 这正是逆约旦变换所需要的。对补偿后的时频分布图计算逆约旦变换, 可得目标的窄带成像图, 如图 3(f) 所示。目标的 IRT 图像有 2 个显著点, 它们的连线过图像中心, 清晰地反映了目标的结构。

图 4 所示为传统处理方法的窄带成像结果, 即直接在原始时频分布上进行逆约旦变换。从图 4 可看出目标散射中心无法得到正确聚焦, 图像较为混乱, 无法反映目标的结构。

对比传统方法与本文方法, 可以得出如下结论: 1) 目标平动将在时频分布图中引入趋势项, 使传统窄带成像方法失效; 2) 本文所提的窄带成像方法能够实现估计复合微动空间目标的窄带成像, 得到清晰的目标结构。

## 4 结论

针对复合微动空间目标, 本文提出基于时频相关系数、多普勒频率峰值差值序列和逆约旦变换的窄带成像方法, 能够去除目标平动的影响, 实现复合微动条件下目标的窄带成像。其中时频相关系数可实现平动条件下的微动周期估计, 多普勒频率峰值差值序列则用于估计目标的平动参数, 最后对补偿后的时频分布图进行逆约旦

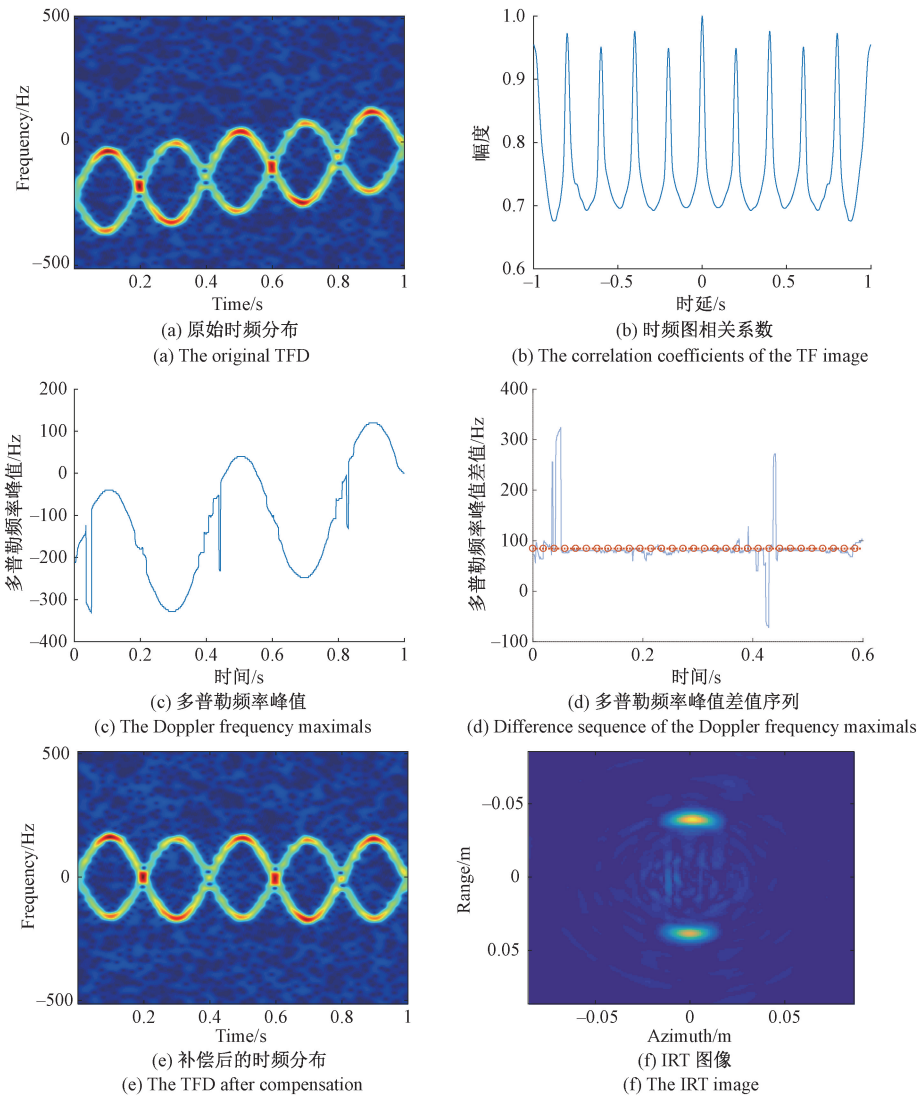


图3 复合微动目标窄带成像结果

Fig. 3 The narrow-band imaging result of the compound micro-motion target

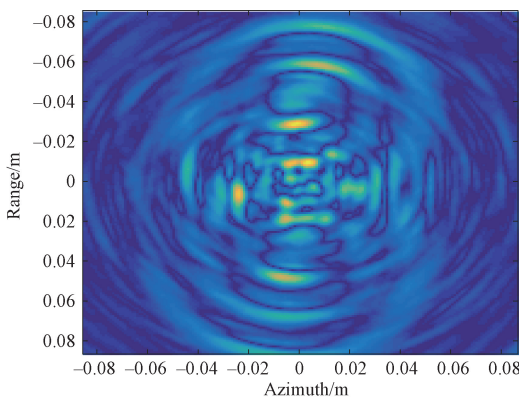


图4 传统方法窄带成像结果

Fig. 4 The narrow-band imaging result of the traditional method

变换得到能够反映目标结构的清晰图像,克服了传统窄带成像方法在复合微动条件下失效的缺点。

参考文献

[ 1 ] 徐楚,朱栋强,汪玲,等.基于零空间  $l_1$  范数最小化的 ISAR 成像方法 [ J ]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(2) :315-321.  
XU CH, ZHU D Q, WANG L, et al. ISAR imaging using null space  $l_1$  norm minimization [ J ]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(2) :315-321.

[ 2 ] 马俊涛,高梅国,胡文华,等.空间目标多站 ISAR 优化布站与融合成像方法 [ J ]. 电子与信息学报, 2017, 39( 12 ) :2834-2843.  
MA J T, GAO M G, HU W H, et al. Optimum distribution of multiple location ISAR and multi-angles fusion imaging for space target [ J ]. Journal of

- Electronics & Information Technology, 2017, 39(12): 2834-2843.
- [ 3 ] 刘震宇, 陈惠明, 陆蔚, 等. 基于改进经验模态分解的雷达生命信号检测[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12):171-178.  
LIU ZH Y, CHEN H M, LU W, et al. Radar vital signal detection based on improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(12): 171-178.
- [ 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 ] TEKELI B, GURBUZ S Z, YUKSEL M, et al. Classification of human micro-doppler in a radar network [C]. IEEE Radar Conference (RADAR), 2013.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] 贺峰, 刘承兰, 朱国富, 等. 基于距离和差值序列的复杂运动目标微动特征提取[J]. 电子学报, 2012, 40(3):422-428.  
HE F, LIU CH L, ZHU G F, et al. Micro-motion signature extraction of targets with complex motions based on summation and difference sequence of ranges [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(3):422-428.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] 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, et al. Micro-motion features extraction of wind farm echoes based on singular value decomposition [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(4): 588-595.
- [ 10 ] 丁小峰, 姚辉伟, 范梅梅, 等. 基于层析投影算法的空  
间旋转目标窄带雷达成像[J]. 信号处理, 2010, 26(5):648-653.  
DING X F, YAO H W, FAN M M, et al. Narrowband imaging for spatial rotating targets based on tomography algorithm [J]. Signal Processing, 2010, 26(5): 648-653.
- [ 11 ] 赵新燕, 曹文杰. 基于窄带雷达回波的飞机旋翼参数估计[J]. 舰船电子对抗, 2017, 40(4):66-70, 83.  
ZHAO X Y, CAO W J. Parameter estimation of aircraft rotor based on narrow-band radar echo [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2017, 40(4):66-70, 83.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] YU W, WANG J. Phase adjustment for extraction of micro-motion information of ballistic targets [C]. 5th International Congress on Image and Signal Processing (CISP), 2012:1837-1840.
- [ 14 ] ZHANG W P, FU Y W, NIE L, et al. Parameter estimation of micro-motion targets for high-range-resolution radar using highorder difference sequence [J]. IET Signal Processing, 2018, 12(1):1-11.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] 赵燕, 龙桂铃. 一种改进的复合运动空间目标微动周期估计方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(2):60-66.  
ZHAO Y, LONG G L. Improved micro-motion period estimation method for space targets with compound motion [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(2):60-66.
- [ 17 ] 杨宏飞, 何正日. 时频分析在雷达信号识别中的应用[J]. 电子科技, 2016, 29(8): 58-60.  
YANG H F, HE ZH R. Time-frequency analysis in radar [J]. Signal Recognition Electronic Science and Technology, 2016, 29(8): 58-60.
- [ 18 ] 白航, 赵拥军, 胡德秀, 等. 基于改进时频分析方法的雷达信号瞬时频率估计[J]. 信号处理, 2012, 28(2):257-263.  
BAI H, ZHAO Y J, HU D X, et al. Instantaneous frequency estimation for radar signals based on improved time-frequency distribution [J]. Signal Processing, 2012, 28(2):257-263.

- [19] 魏迅, 袁伟明, 郭汝江. 基于 S-Method 分布的微多普勒特征分析[J]. 电子测量技术, 2017, 40(1):76-80.  
WEI X, YUAN W M, GUO R J. Analysis of micro-Doppler features based on S-Method [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(1):76-80.
- [20] 刘通, 徐政五, 吴元杰, 等. 太赫兹频段下基于 EMD 的人体生命特征检测[J]. 信号处理, 2013, 29(12):1650-1659.  
LIU T X, XU Z W, WU Y J, et al. Human life feature detection based on EMD method in THz band [J]. Signal Processing, 2013, 29(12):1650-1659.

## 作者简介



侯艳斐, 2006 年于青岛大学获得学士学位, 2010 年于北京信息科技大学获得硕士学位, 现为吕梁学院助教, 主要研究方向为机电一体化、自供电。

E-mail:

**Hou Yanfei** received her B. Sc. degree from Qingdao University in 2006, M. Sc. degree from Beijing Information Science & Technology University in 2010. Now she is an assistant lecturer at Lvliang University. Her main research interests include mechatronics and self-powered.