

微动目标雷达特征提取、成像与识别研究进展

张群^{*①②} 胡健^{①③} 罗迎^{①②} 陈怡君^④

^①(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

^②(复旦大学电磁波信息科学教育部重点实验室 上海 200433)

^③(中国人民解放军95633部队 邛崃 611531)

^④(武警工程大学信息工程学院 西安 710086)

摘要: 微动目标的雷达特征提取、成像与识别技术是雷达目标精确识别领域极具发展潜力的研究方向之一。该文首先简要阐述了微动的相关概念,然后综述了近年来微动目标回波建模、微动特征提取、微动目标成像以及基于微动特征的雷达目标分类与识别等方面的研究现状,并介绍了几种典型前沿应用,最后对微动目标雷达特征提取、成像与识别的研究发展趋势进行了展望。

关键词: 微动; 微多普勒; 特征提取; 雷达成像; 目标识别

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2018)05-0531-17

DOI: 10.12000/JR18049

引用格式: 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.

Reference format: 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.

Research Progresses in Radar Feature Extraction, Imaging, and Recognition of Target with Micro-motions

Zhang Qun^{①②} Hu Jian^{①③} Luo Ying^{①②} Chen Yijun^④

^①(Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

^②(Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves (Ministry of Education), Fudan University, Shanghai 200433, China)

^③(Troop of No.95633, PLA, Qionglai 611531, China)

^④(Information Engineering Faculty, Engineering University of Armed Police Force, Xi'an 710086, China)

Abstract: The technique of radar feature extraction, imaging, and recognition of target with micro-motions has become one of the most potential research directions in the field of radar target accurate recognition. In this paper, the concept of micro-motion is first introduced briefly. Subsequently, the achievements of echo modeling, feature extraction, imaging, and identification of micro-motion targets are summarized. Several typical frontier applications are then introduced. Finally, the future development trends of the research are discussed.

Key words: Micro-motion; Micro-Doppler; Feature extraction; Radar imaging; Target recognition

1 引言

随着现代信号处理技术、半导体技术和计算机技术的突飞猛进,雷达功能已从单一的尺度信息测

量发展为特征信息测量,即从传统的用于检测、测距和测角等坐标参数测量的探测跟踪雷达,发展为可实现目标精细结构刻画和精细运动特征提取等功能的特征测量雷达^[1],从而为雷达目标识别提供更丰富的特征信息。然而,随着目标控制技术以及虚假目标数字合成技术的快速发展与实用,各种假目标和诱饵已经能够精确模仿真实目标的运动轨道、雷达散射截面(Radar-Cross Section, RCS)、几

收稿日期: 2018-06-25; 改回日期: 2018-08-08; 网络出版: 2018-09-10

*通信作者: 张群 zhangqunnus@gmail.com

基金项目: 国家自然科学基金(61631019, 61571457, 61471386)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61631019, 61571457, 61471386)

何结构、表面材料等特征,基于传统特征信息的雷达目标识别,特别是非合作目标识别变得困难甚至失效^[1,2]。

雷达目标或目标部件在运动的同时往往还伴随着除质心平动以外的振动、转动和加速运动等微动(Micro-motion或Micro-dynamics)^[2]。目标微动会对雷达回波的相位进行调制,进而产生相应的频率调制,在由目标主体平动产生的雷达回波多普勒频移信号附近引入额外的调制边带。这个额外的调制信号称为微多普勒信号,这种由微动引起的调制现象称为微多普勒效应(Micro-Doppler effect)。早期人们在进行信号处理时,通常把微多普勒信号当作旁瓣或干扰等不利因素而设法加以剔除。其实,微多普勒效应可被视为目标结构部件与目标主体之间相互作用的结果,反映的是多普勒频移的瞬时特性,表征了目标微动的瞬时径向速度。微多普勒信号中所包含的信息可以反演出目标的形状、结构、姿态、表面材料电磁参数、受力状态及目标独一无二的运动特性。通过现代信号处理技术分析目标的微多普勒效应并提取微多普勒信号中蕴含的特征信息,能够更好地分辨目标的属性类型和运动意图,从而为雷达目标的准确探测与精确识别提供不依赖于先验信息、可靠性高、可分性好的重要特征依据。

微动最早是在相干激光雷达系统中得到研究的,2000年美国海军研究实验室(Naval Research Laboratory, NRL)的V. C. Chen将微动及微多普勒的概念正式引入到微波雷达观测领域,并证实了尽管微多普勒效应对雷达系统工作波长敏感,但借助于高分辨的时频分析技术,在微波雷达中仍然可以观测到目标的微多普勒效应,开拓了基于雷达信号的目标微动特性研究这一新领域。此后,微动目标特征提取、成像与识别技术受到了国内外大量科研机构 and 学者的重视与关注,并取得了丰富的研究成果。本文首先简要介绍微动目标的雷达回波模型及特点,然后从微动特征提取、微动目标成像以及微动目标分类与识别3个方面进行重点阐述,并介绍了几种典型的前沿应用,最后对现有难点和发展趋势进行了总结和展望。

2 微动目标回波模型

对大多数微动目标而言,雷达均工作于高频段,目标总的电磁散射可被近似认为是某些局部位置上电磁散射的相干合成,此时可以采用点散射模型来描述目标的电磁散射特性。基于点散射模型假设,V. C. Chen对旋转、振动、翻滚和锥动4种典型的微动形式及其引起的微多普勒效应进行了数学

建模、理论推导和仿真研究^[3]。T. Thayaparan^[4]进行了角反射器外场测试实验,得到了与理论推导相一致的结果。对于旋转等简单形式的微动,其在雷达视线(Line-Of-Sight, LOS)方向上的运动形式为简谐运动,理想条件下微多普勒频率可建模为^[5]:

$$\begin{aligned} f_{m-D}(t) &= \frac{2}{\lambda} [\mathbf{w} \times \mathbf{r}(t)]^T \cdot \mathbf{n} \\ &= \frac{2A_0w_0}{\lambda} \cos(w_0t + \varphi_0) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, λ 为雷达发射信号波长, \mathbf{w} 为旋转角速度矢量, $\mathbf{r}(t)$ 为 t 时刻旋转半径矢量, \mathbf{n} 表示LOS方向, A_0 为径向微动幅度, w_0 为目标微动频率, φ_0 为简谐运动的初始相位。对于振动、翻滚等其他类型的简单微动形式,其微多普勒频率在理论上也具有如式(1)所示的表达形式。图1(b)给出了我们在暗室环境下采集的单散射点目标(金属球目标)做旋转运动时雷达回波的时频分析结果。可以看出,目标典型微动的微多普勒频率与其微动频率、微动幅度以及LOS等因素相关,其随时间的变化规律表现为正弦调频(Sinusoidal Frequency Modulation, SFM)信号形式,因此在时频图像中也呈现出正弦变化规律。事实上,由于微动目标往往并不满足各向同性的理想点散射模型假设,因此微动过程中散射中心位置、强度的变化还会对回波幅度进行非线性调制,因此在实际应用中还需要考虑目标姿态变化、目标形状、回波不连续、遮挡效应等因素的影响。另外,雷达发射信号参数也会对微多普勒频率的观测造成影响。

在宽带成像雷达中,由于雷达的距离高分辨能力,目标径向微动幅度有可能远大于雷达的距离分辨单元,因此在完成回波平动补偿后,目标的微动通常导致散射点发生越距离单元走动,目标回波在1维高分辨距离像(High Resolution Range Profile, HRRP)序列中呈现为对应于各微动散射点径向微动历程 $\mathbf{r}(t)^T \mathbf{n}$ 的多条距离-慢时间平面上的变化曲线。此时,除了可用式(1)所示表达式描述微动引起的雷达回波调制特征以外,还可以直接用 $\mathbf{r}(t)^T \mathbf{n}$ 来描述距离-慢时间域的调制特征。图1(c)所示为暗室采集的4个金属球目标进行旋转运动时的距离-慢时间像。

在现实场景中,很难找到仅具有单一运动模式的目标,多数雷达目标的运动都呈现为多种运动形式的复合。根据运动分量的不同,可以分为以下两种主要复合运动类型:(1)平动与简单微动形式的复合。目标或目标部件具有旋转、振动等简单微动的同时,还伴有整体的平动,如空间自旋碎片、直

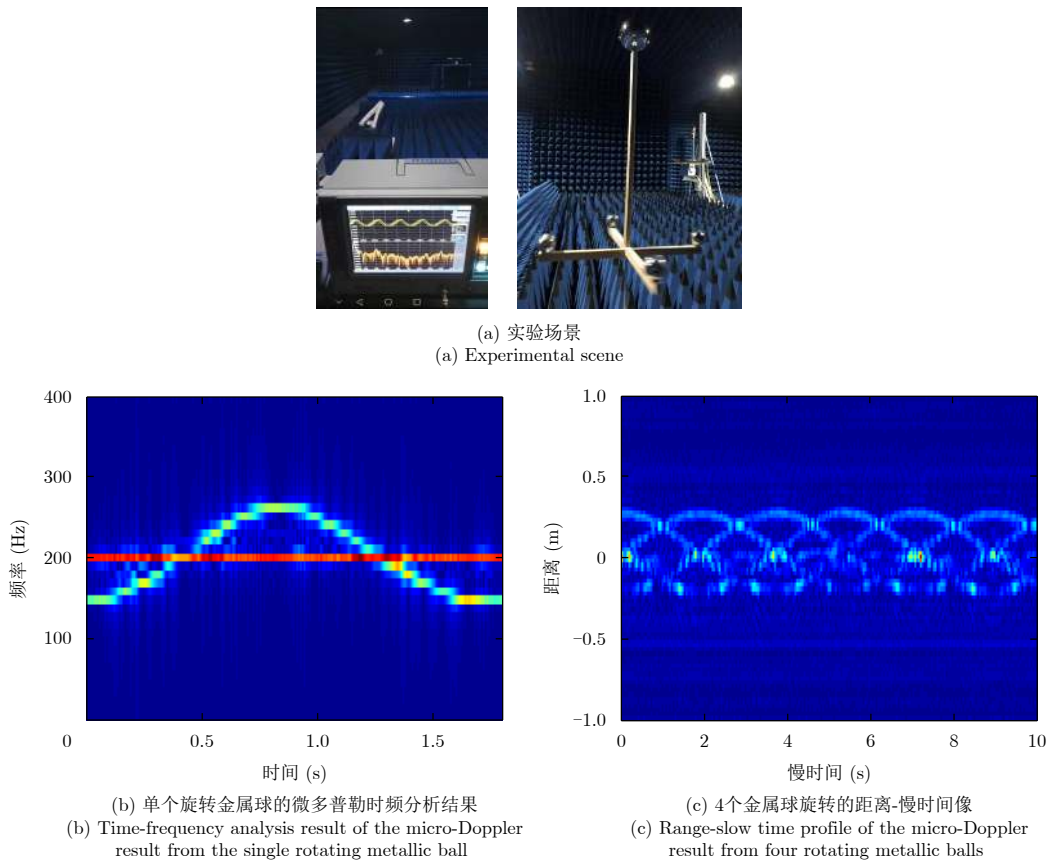


图1 微动目标暗室观测回波分析

Fig. 1 Echo signal analysis results of micro-motional targets in the anechoic chamber

升机、螺旋桨飞机、行进车辆等。在补偿完平动分量引起的回波调制后，其微动回波在时频域和距离-慢时间域均具有正(余)弦调制规律。这类目标的微动回波建模相对简单，研究工作也已经较为成熟。(2)平动与复杂微动形式的复合。目标在平动的同时，目标或目标部件还复合有多种微动形式，如弹头目标、海面舰船目标、坦克目标、人体目标、鸟类目标等。中段飞行的弹道目标在维持自身稳定、空间定向进行自旋的同时，还会因为气流扰动、弹体分离、多弹头或诱饵释放时来自其他载荷横向力矩的干扰等进行锥旋和摆动^[6]，因此其微动形式表现为合成的进动或章动。图2给出了用电磁散射计算软件得到的进动目标微多普勒特征，可见进动目标的微多普勒不再服从简单的正弦规律，而是表现为多个正弦分量的叠加^[7]；当目标为光滑旋转对称体时，随着观测视角的改变，散射中心将在目标体上滑动^[8]。文献^[9]建立了多场景条件下海面微动目标的回波模型，并通过实测数据验证了理论分析的正确性。坦克目标除了整体平动以外，还包括履带的周期运动、承重轮和驱动轮等的转动、炮塔的旋转等，文献^[10]对此进行了建模分析。由于人体运动状态(如静止、行进、踏步、匍匐前进

等)变化复杂、属性(如性别、年龄、身高、体重等)差异明显，其微动形式(躯体非匀速行进、心脏跳动、胸腔起伏、手腿摆动等)表现多样，因此人体目标回波建模是一个非常复杂的问题，到目前为止还没有一个理想的解决方案。通常的做法是从建立人体目标运动学模型来逼近人体目标真实运动^[11]、建立人体目标结构模型来逼近人体目标组成^[12]、建立人体目标RCS模型来逼近人体目标雷达回波特性^[13]等角度来对人体目标进行雷达回波建模。此外，文献^[14,15]还研究了鸟类目标等其他生物目标的微动特征，建立了鸟类目标飞行时振翅所引起的回波调制模型，分析了其产生的微动特征。总地来看，对于平动与复杂微动形式相复合的这类目标，其微动回波模型显得更为复杂，也提升了后续的特征提取、成像和识别处理的复杂度。

除了孤立目标，雷达还常常面临由多个目标组成的群目标，如导弹突防时由多个弹头、诱饵和碎片形成的群目标，失效载荷、火箭残骸等组成的空间碎片群，空中编队飞行的战斗机/直升机/无人机集群，海面众多的舰船目标以及地面驻停车辆群等。一般地，当多个目标位于雷达发射信号的一波束范围内时，各目标回波在时域或频域相互叠

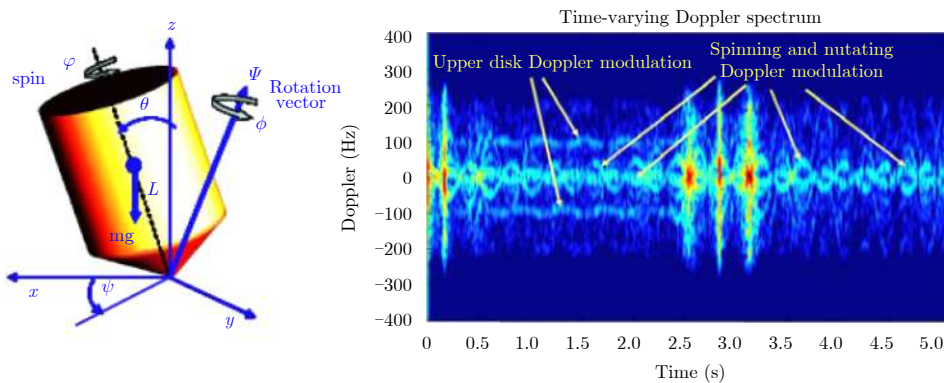


图 2 进动目标微多普勒特征示例^[7]

Fig. 2 Micro-Doppler feature example of the precession target^[7]

加，称这多个目标为群目标，群目标中的单个目标称为子目标^[16]。构成群目标的各子目标往往运动参数及结构参数均较为相近，但是其微动参数各异，根据目标微动特性差异建立合适的回波模型，有助于更好地从群目标回波中分离出各子目标回波分量，实现各子目标微动特征提取。在理想条件下，群目标的微动回波可近似看作是各子目标回波之和，如文献^[17]提出了多目标微多普勒(Multi-target Micro-Doppler, MMD)的概念，并建模研究了振动/旋转群目标的分辨方法；文献^[18]研究了弹道群目标分辨及微动特征提取方法。但在实际应用中，还需考虑各子目标相互之间的电磁耦合作用，这一工作还有待进一步地深入研究。

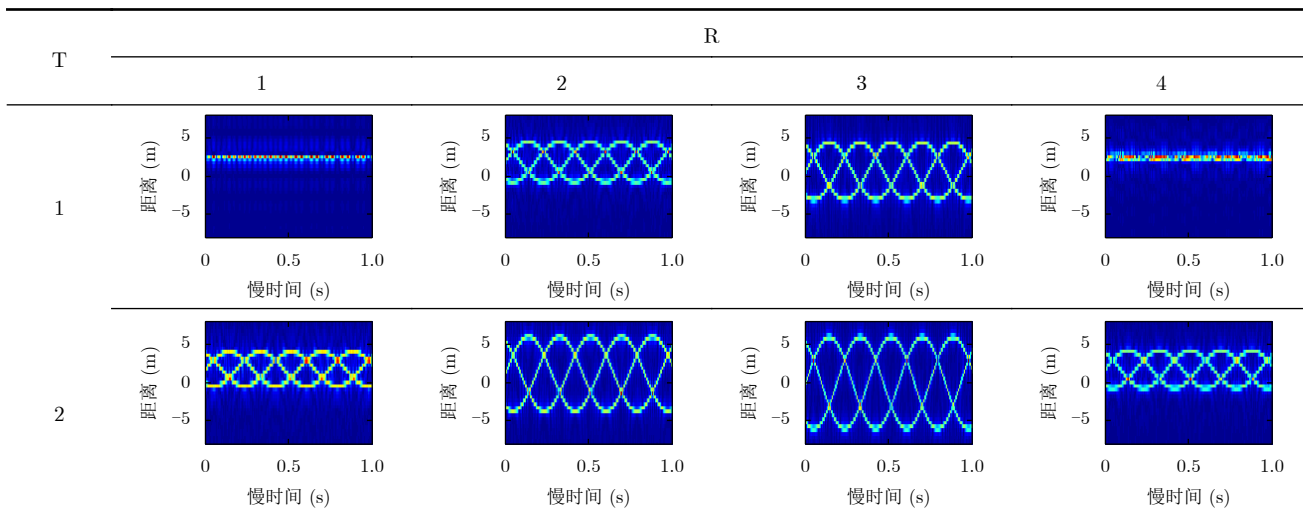
基于双基雷达、分布式多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)雷达、阵列雷达或组网雷达等多通道雷达来探测微动目标也是一个重要的发展趋势。这类雷达的多视角特性可以克服单基雷达姿态敏感性的局限及遮挡效应的影响，形成

多视角资源互补，从而获得目标更为准确的微动特征。同时，多通道处理还可以更好地实现微动特征与目标运动特性之间的关联匹配，提高目标分类的准确性^[19]。对比单基雷达中目标微多普勒效应，文献^[20–22]称分布式MIMO雷达或组网雷达中目标的微多普勒效应为“3维微多普勒(Three-dimensional micro-Doppler)”效应。由于多通道雷达收发分置的特殊空间结构以及目标的散射各向异性，目标微多普勒效应与雷达构型以及目标相对于雷达的姿态之间都存在耦合^[21](如表1所示，组网雷达中各子雷达所观测到的目标微动特征都不相同)，这为提取目标的空间3维微动特征提供了前提基础。

3 微动特征提取

微动特征提取主要是通过分析回波的调制特性，从中获取反映目标结构、运动等信息的特征量，并基于特征量实现对目标结构、尺寸、属性、类别和运动状态等参数的估计，为目标成像、分类

表 1 分布式MIMO雷达系统(2个发射阵元和4个接收阵元)每对收发阵元获得的有3个旋转散射点目标的微动特征
Tab. 1 Micro-motion feature of a rotating target with three scatterers received by transceivers in a distributed MIMO radar system (2 transmitters and 4 receivers)



与识别提供基础。根据实现途径的差异, 雷达目标微动特征提取方法可以分为以下几类。

3.1 基于变换域的微动特征提取

基于变换域的微动特征提取方法是通过寻求各种域变换方法来改善微多普勒信号在原始域中的分布结构, 去除冗余特征, 压缩特征维数, 从而更好地提取信号特征。

微动本质上是一种非匀速或非刚体运动, 微动目标对雷达信号的响应相当于非线性系统的响应, 因此微多普勒信号具有时变非平稳的特点。早期利用傅里叶变换, 通过频谱分析来进行微动特征提取的方法只能获得信号在频域的全局特性, 缺乏频域的定位功能, 对非平稳信号不再适用。时频分析通过构造同时关联目标时间和频率的密度函数, 将微多普勒信号变换到时频域, 能够揭示信号中包含的频率分量及其演化特性, 是微多普勒特征分析中最经典的手段。在时频域中, 一般是通过Hough变换^[23]、广义Radon变换(Generalized Radon Transform, GRT)^[24]、逆Radon变换(Inverse Radon Transform, IRT)^[25]等方法将边缘检测问题转化为参数空间中的峰值检测问题来提取目标的微动特征。目前, 这类方法多用于提取旋转或振动目标的微动特征, 事实上, 对于其他微动形式, 只要能写出其运动方程, 再推导出时频域中对应的曲线方程, 通过构造相应的变换方程, 就可以实现目标微动特征的提取。应当指出的是, 该方法的运算量是随着参数空间的维数成指数增长的, 为了降低运算量可以采取一些快速算法, 或者采用并行计算的方法来提高运算速度。

由旋转、振动等微动引起的微多普勒信号均表现为SFM信号形式。由于傅里叶基、线性调频基与SFM信号频率时变、调制非线性的特点不相吻合, 直接分析微多普勒信号相对困难。文献^[26]建立了具有独特运算定义的正弦调频信号域, 提出了正弦调频傅里叶变换(Sinusoidal Frequency Modulation Fourier Transform, SFMFT)。由于能够长时间有效积累信号的微多普勒信息, SFMFT可以实现小

幅微动、多微动频率成分等情况下的微动特征提取, 较传统时频方法大幅度提高了参数估计精度和抗噪性能。但是当信号分量达到3个以上时, 信号在SFMFT域的谱线将会产生干扰项, 难以根据变换域频谱准确判断信号实际的频率成分。文献^[27]提出了正弦调频傅里叶贝塞尔变换(Sinusoidal Frequency Modulation Fourier-Bessel Transform, SFMFBT), 推导证明了SFMFBT的正交性、准周期性、幅值特性及频率分辨率等关键性质。SFMFBT利用了信号的全部时间积累增益, 避免了SFMFT中多分量交叉项的问题, 与传统基于Bessel基函数的变换^[28,29]相比, 克服了变换域信号频率分辨率精度不足的缺陷, 用于SFM信号的调制频率估计与多分量信号的分离重构都能够获得更高的估计精度。图3所示为利用SFMFBT分离多分量SFM信号的结果。这些新的信号变换方法对于进一步发展与完善微动特征提取方法具有重要的参考价值。

3.2 基于图像域的微动特征提取

如前所述, 在宽带成像雷达中, 可以通过分析回波在1维距离像序列中的调制特征来获得目标的微动特征参数。HRRP是目标散射中心在雷达视线方向上的投影, 微动对HRRP的调制影响主要表现为同一散射中心的分布、强度在HRRP序列间有规律地变化, 这种对散射中心的周期性调制是基于HRRP序列提取微动特征的基础。通过采用Hough变换、Radon变换等方法提取距离-慢时间域上各微动散射点的径向微动历程, 实现对空间微动目标锥旋周期^[30,31]、进动角^[32]与目标长度^[31,33]等参数的估计。但是由于HRRP的方位敏感性、平移敏感性、强度敏感性、初相敏感性, 特别是HRRP对目标姿态变化非常敏感, 方位角每变化 0.2° , 就需要用一个新的距离像来表征目标^[34]。因此, 距离像序列长度不够时, 估计得到的目标参数就极不稳健。此时基于连续长时间观测所获得的HRRP处理^[33]或者基于多视角同时观测获得的HRRP联合处理^[35], 都能够获得目标真实可靠的微动特征。

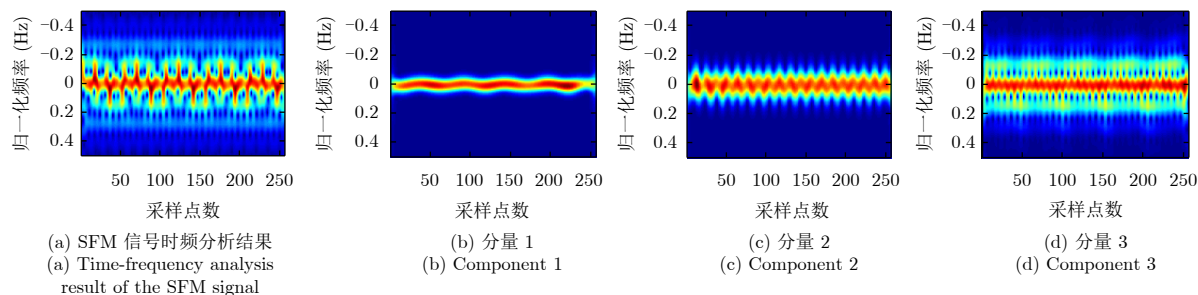


图3 多分量SFM信号及其SFMFBT分离结果

Fig. 3 Multi-component SFM signal and its SFMFBT separation results

此外,在宽带成像雷达中,当雷达工作于高重频条件下时,还可以通过逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)成像序列来提取目标的微动特征。ISAR通过距离向和方位向上的脉压处理来获得目标散射中心的2维分布,相比于HRRP, ISAR像能够更加准确直观地反映目标的形状与尺寸特性。基于ISAR像可以提取到区域面积、目标周长、形状参数以及体态比等目标特征。文献[36]利用T/R-R双基地雷达联合成像获得了反映目标真实尺寸的2维ISAR像,并提取到了目标的进动特征;文献[37,38]根据弹道目标ISAR像序列提取了目标的几何特征;文献[13]采用失真ISAR像中的多普勒展宽范围估计出了车轮的转速、朝向以及行人的步态等信息。

3.3 基于稀疏重构的微动特征提取

微动目标回波可视为少数强散射中心回波的叠加,天然具有稀疏特性,因此,可以采用稀疏重构的方法分析微多普勒信号,提取微多普勒特征。压缩感知(Compressed Sensing, CS)理论基于信号的稀疏性或可压缩性,利用少量的数据就可以实现对原始信号的高概率准确重构[39]。基于CS的微多普勒特征提取方法是近年来的研究热点之一,出现了基于Smoothed L0 (SL0)、稀疏贝叶斯学习(Sparse Bayesian Learning, SBL)等算法的一系列微动参数估计方法[40]。文献[41,42]分别提出基于CS的联合时频分布(CS Joint Time-Frequency, CSJTF)和基于投影到凸集合(Projections Onto Convex Sets, POCS)的优化方法,获得了分辨率高、无交叉干扰项的2维时频分布,并用于提取微多普勒特征。文献[43]采用在回波域建立字典的方式,提出了基于SBL的微动目标参数估计与成像方法。利用微动目标回波信号在距离-慢时间域具有稀疏性的特点,文献[44]通过在ISAR复图像域建立字典,提出基于复图像正交匹配追踪(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)的微动参数估计方法,在欠采样条件下获得了较好的估计效果。

在实际进行微多普勒信号处理时经常会面临观测时间有限以及数据稀疏的问题,利用CS等稀疏重构方法不但能降低数据维度,还可以提高算法在低采样率条件下的特征提取精度。另外,当微动引起的最大多普勒频移大于雷达脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)的两倍时,目标回波信号会在频域混叠,由于CS理论是基于信号在特定变换域上稀疏的假设,因此在微动目标回波频域混叠的情况下也能够实现信号的良好表征,从而有效提取微动特征。

3.4 3维微动特征提取

在单基雷达条件下,雷达回波的微多普勒特征参数由目标微动部件运动矢量在LOS方向上的投影值决定,因此通过回波只能提取到目标微动部件在LOS方向上的特征。由于目标姿态变化的复杂性,在不同的雷达视角下,其微多普勒特征将呈现出显著差异,从而影响目标识别的准确度。若要克服目标微多普勒特征的姿态敏感性,必须要设法从雷达回波中重构出能够反映目标微动部件真实空间结构和运动特性的3维微动信息。

分布式MIMO雷达和组网雷达都具有多个收发通道,能够获得目标在各个视角上的信息。由于目标微动在不同视角上有着不同的投影分量,利用各天线接收到的回波信号差异可望重构目标微动部件的空间3维运动和结构特征,从而提高雷达的目标识别能力。基于这一原理,空军工程大学的罗迎博士研究了基于多载频窄带MIMO雷达[20]与正交频分线性调频(Orthogonal Frequency Division Multiplexing-Linear Frequency Modulation, OFDM-LFM)信号MIMO宽带雷达[21]的旋转目标3维微动特征重构技术,以及基于分布式组网雷达的有翼弹头目标3维进动特征重构技术[22]。文献[45]与文献[46]利用组网雷达的多视角特性构建非线性方程组提取了弹道目标的3维进动特征。

通过多天线干涉处理的方式也可以获得目标散射中心的真实3维重构,进而实现目标3维微动特征提取。文献[47]通过干涉处理获得了微动散射点在各时刻的3维坐标变化历程,然后根据各散射点的空间位置变化反演出了目标的微动参数。这种方法本质上也是通过多通道处理来获得由微动导致的目标散射中心位置时间变化规律,从而为目标精确识别提供更为稳健的特征信息。

4 微动目标成像

微动目标成像的特点是目标在相干处理时间内存在复杂的姿态变化,如弹头的进动,飞机的机动以及直升机叶片的旋转,汽车引擎的振动,舰船俯仰、横滚和偏航方向上的转动,行人胳膊的摆动等,这些复杂的姿态运动引起目标多普勒频率非线性时变和成像平面的变化,从而导致传统方法无法清晰成像[48]。此外,与传统的SAR/ISAR成像都需要发射宽带信号来实现距离向的高分辨成像不同,对于微动目标回波,窄带雷达通过微多普勒分辨也能实现散射点的距离向分辨,因此,在窄带雷达中也能够实现微动目标成像。下面从刚体目标成像、非刚体目标成像与微动目标3维成像3个方面进行阐述。

4.1 刚体目标成像

刚体目标在运动过程中目标上各点之间的距离、内部各部分相对位置始终保持不变。空间碎片、弹道中段目标等都是典型的刚体目标,表现出目标整体微动的特点。对于这类目标,可以通过利用目标上各散射点微多普勒频率变化的不同来实现窄带雷达条件下的成像。文献[49]提出一种单距离多普勒干涉算法(Single Range Doppler Interferometry, SRDI),通过在时频面上对单个距离单元的回波数据进行曲线积分来获取目标的2维图像。在此基础上,文献[50,51]分别提出基于相位匹配滤波(Single Range Match Filter, SRMF)和相干窄带多普勒干涉(Coherent Single Range Doppler Interferometry, CSRDI)的空间旋转目标成像算法。文献[52]提出一种基于时频重排理论和广义Radon变换(Time-Frequency Rearrangement and Generalized Radon Transform, TFR-GRT)的中段目标窄带雷达成像算法,并深入研究了基于窄带回波的中段目标层析成像理论[53],从新的角度实现了中段目标的窄带2维成像与反演。

在宽带雷达中,目标的整体微动使其相对于雷达视线的姿态发生非均匀变化,直接采用传统ISAR成像中的FFT处理会导致方位向聚焦模糊。另外,由于雷达发射信号的脉冲重复频率有限,中段目标的微动使得在成像所需转角时间内回波脉冲数量过少,导致传统的ISAR成像算法,包括距离-多普勒(Range-Doppler, RD)算法及距离-瞬时多普勒(Range-Instantaneous Doppler, RID)算法质量不理想,甚至难以成像。而利用目标雷达回波准确估计微动参数,则可以实现微动目标成像。文献[54]利用弹道目标微动所引起的目标相对雷达视线角的快速变化,提出了一种基于匹配追踪(Matching Pursuit, MP)稀疏分解的微动目标ISAR成像算法,获得了较好的成像精度和稳定性。文献[55]建立了弹道微动目标的LFM雷达回波模型,分析了微动对ISAR成像的影响,提出了一种基于GRT-Clean的多分量LFM信号时频参数估计方法,用于实现对近似匀加速转动的中段目标的ISAR成像。

4.2 非刚体目标成像

非刚体目标指目标与其部件之间存在独立于目标主体运动的相对运动。当雷达目标为非刚体时,目标回波为雷达观测时间内目标主体回波和微动部件回波叠加的多成分信号。由于微动部件与目标主体部分的运动特征不同,直接对目标进行成像,微动部件产生的微多普勒将会导致微动散射点所在的距离单元无法实现方位向聚焦,从而在所成图像中

出现干扰条带^[1]。当微动部件回波信号很强时,干扰会遮盖部分甚至大部分主体图像,严重影响成像质量。因此,早期的成像算法通常都是将微动部件的回波作为干扰从整体回波中滤除,但是这样损失了微多普勒信号中所包含的结构和运动特征等信息,不利于对目标进行全面准确的描述。

为了对非刚体目标主体和微动部件分别成像,需要在完成平动补偿的基础上,根据目标回波特性将主体回波和微动部件回波有效分离,并用传统方法获得主体部分高分辨成像结果,同时对微动部件进行微多普勒分析以获得其微动特征,进而实现微动部件成像。根据微多普勒信号分离方式的不同,现有两条途径来对非刚体目标进行成像。一是基于时域信号完成回波分离,进而实现目标成像,即根据目标主体回波和微动部件回波的特性差异,把时域回波信号分解成一系列基函数,然后利用这些基函数重构微多普勒分量,再对分离后的回波分别成像。文献[56]和文献[57]分别采用二元变分模式分解(Bivariate Variational Mode Decomposition, BVMD)与复局域均值分解(Complex Local Mean Decomposition, CLMD)的方法分离目标微动部件回波与主体回波,然后分别进行成像。另一条途径是从时频2维平面中分离出微多普勒的瞬时频率和目标主体的瞬时频率,然后再将分离开的各信号分量变换回时域信号分别成像。文献[58]根据谱图的顺序统计量,分别获取目标主体、旋转/振动部件在谱图中的位置区域和强度信息,进而实现主体和微动部件回波信号分离,重新得到了目标主体清晰的SAR/ISAR像。文献[23]采用Hough变换和扩展Hough变换得到了目标主体部分的2维图像,同时提取了旋转部件的微动信息。

4.3 微动目标3维成像

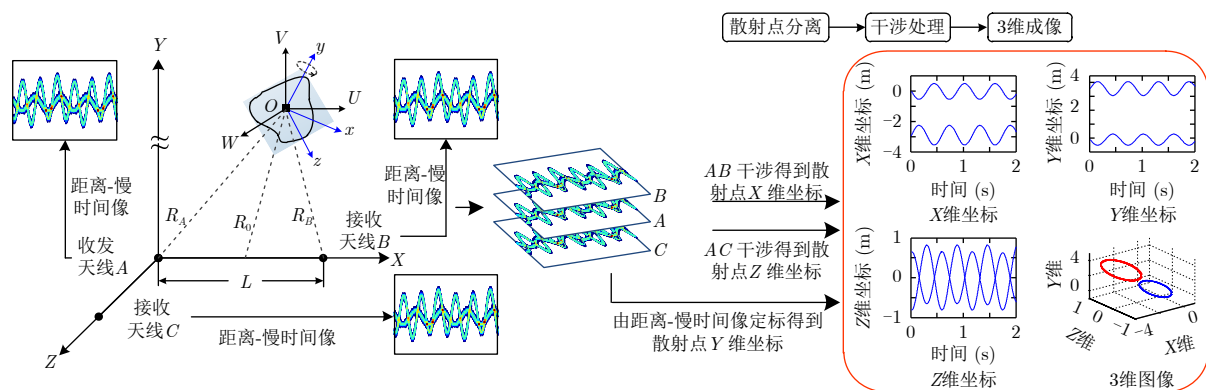
相比于2维图像,3维立体图像增加了目标垂直于成像平面的高度信息,是目标3维几何结构分布的真实体现,且对目标姿态的变化不敏感,能为目标识别提供更加完整、稳健的结构、形状与属性信息。近年来关于微动目标3维成像的研究开始被重视,但是公开发表的成果还比较少,主要是针对空间微动目标展开研究。现有的空间微动目标3维成像方法可以分为3类:(1)基于单基雷达的3维成像方法。这类方法是通过分析和提取目标回波微多普勒参数来获得目标上各微动散射点的3维结构和运动特征^[59-62],西安电子科技大学的白雪茹教授在该方向做出了大量工作,提出了对旋转群目标^[16]、旋转对称目标^[63]、进动锥体目标^[64]、存在遮挡的复杂微动目标^[65]的3维成像方法。然而,由于单基雷

达仅能观测到目标在雷达径向距离上的微动分量,因此根据获得的3维成像结果难以确定目标散射点的瞬时真实空间位置。(2)基于双/多基雷达的3维成像方法,利用分布在不同视角的多个雷达观测到的目标特征差异,通过关联处理来获得目标的3维成像结果^[46,66-68]。尽管这类方法在理想条件下可以重构目标散射点在空间的3维分布,也能够准确反演出目标的3维微动特征,但在实际应用中,目标上散射中心的各向异性以及散射点相互之间的遮挡效应将使得各雷达回波的联合处理变得复杂和困难,现有方法在实际应用中的有效性还有待进一步检验。(3)基于多天线干涉处理的3维成像方法,根据目标上微动散射点的微动特性差异在变换域完成散射点分辨,进而对各天线回波进行干涉来获取对应散射点的2维平面坐标,综合距离信息实现散射点的3维坐标重构^[47,69]。图4所示为L型3天线干涉3维成像原理以及对空间旋转目标3维成像的结果。这类方法能够获得目标的真实3维坐标,且不受限于目标的微动形式,但是目标回波微多普勒分析的精度对最终成像结果影响较大,并且干涉成像往往还存在相位模糊的问题。总而言之,微动目标3维成像技术研究尚处于起步阶段,还存在许多问题亟需进一步深入研究。

5 微动目标分类与识别

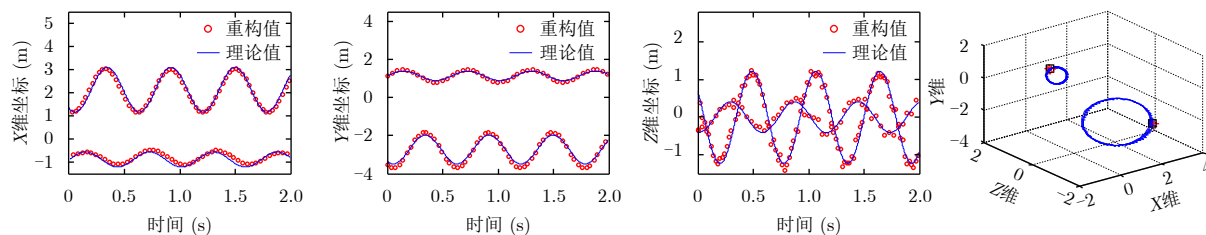
微动特征是雷达目标的本质属性之一,相比于传统的形状、结构和表面材料电磁参数等其他目标特征,其在目标分类与识别应用中有着如下优势:(1)观测条件要求较低,容易被雷达获取。已有研究表明,高分辨雷达能够探测目标表面微米级的振动和偏移,对于弹道导弹目标识别,成像激光雷达可观测到超过700 km远的再入诱饵的展开和膨胀,对低截获率目标,1~2 s的雷达照射就可以收集足以用于目标分类的信息,从而大幅降低雷达平台被反探测的概率^[70]; (2)与HRRP和ISAR像特征等相比,微动特征对目标姿态变化的敏感性相对较低,对先验信息要求少,这对于非合作目标的分类与识别有重要意义;(3)对雷达系统的硬件要求较低,因为目标的微动特征提取并不受限于距离分辨率,无论宽带雷达还是窄带雷达均可以获取。我国现役雷达以窄带为主,在无需大幅升级改造的前提下,利用现有雷达系统就有望实现目标微动特征的获取与处理。因此微动目标分类与识别技术在雷达目标识别领域内的地位日益显著。

微动目标分类与识别可分为两个层面:一是辨识微动的形式,通过微动形式来实现对目标的分类;二是根据获得的微动特征来进一步实现对目标



(a) L型3天线干涉3维成像原理示意图

(a) Principle of the three-dimensional interferometric imaging by the L-shaped three antennas radar



(b) 空间旋转目标干涉3维成像结果

(b) Three-dimensional interferometric imaging results of the rotating space target

图 4 空间目标干涉式3维成像原理及结果

Fig. 4 Three-dimensional interferometric imaging principle and results of space targets

的准确识别。通过设计分类识别方法,将所提取的微动特征从特征空间映射到观测对象属性空间,即达到了对目标或者目标微动形式进行识别的目的。合适的分类识别方法是实现目标正确识别的关键,常用的基于微动特征的雷达目标分类识别方法有:

(1) 统计模式识别方法(Statistical Approach of Pattern Recognition)。统计模式识别方法用给定的有限数量样本集,在已知研究对象统计模型或判别函数类条件下,通过对样本的学习估计出特征矢量的概率分布密度函数,在某种最优准则下保证对目标进行分类时误差概率最小,其重要的数学工具是Bayes决策及其变形规则。基于Bayes规则的统计识别方法^[13,71-73]在获得目标先验知识的情况下能够得到较理想的分类结果,但是通过有限的样本很难准确估计出条件概率密度函数,因此其应用受到限制。

(2) 基于模板匹配(Template-based)的分类方法。基于模板匹配的方法^[74]计算量小、易于移植,是目标识别中最基本的分类方法。匹配时通常采用K最近邻(K-Nearest Neighbor)分类器^[71,73]等,在测试样本与样本库之间进行相关,实现最佳匹配。该方法对模板库依赖程度较高,通常模板越多越精细,匹配效果越好,但同时计算效能也会因此下降。另外,该方法难以完成对未知目标的稳健识别。

(3) 基于模型(Model-based)的分类方法。抽取一定的目标特征,并利用这些特征和辅助知识(如目标距离)来标记目标的模型参数,进而选择一些初始假设实现目标特征的预测^[75]。与基于统计模型的分类方法相比,基于模型的方法在增加新的目标与环境下不必重新训练算法,新的模型可直接加入知识库^[76]。高斯混合模型(Gaussian Mixture Model, GMM)^[77,78]和隐马尔可夫模型(Hidden Markov Model, HMM)^[77,79]是两类常用的微动目标识别模型,能够对车辆、人、动物等目标特征的统计分布进行准确描述。

(4) 基于人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)的分类方法。ANN是模拟人脑神经系统的信息处理过程和学习功能而设计的一种信息处理系统,由于其在自学习、自组织、巨量并行、分步存储、非线性拟合和容错性等方面的明显优势,ANN在模式识别领域获得了极大重视和广泛应用^[79,80]。但是当识别条件改变时,ANN往往要重新训练,并且ANN方法模型建立困难,学习能力相对较弱,在处理小样本问题时还存在过学习的现象,这些问题都需要进一步的研究。

另外,也有将线性判别分析(Linear Discriminant

Analysis, LDA)^[73],支持向量机(Support Vector Machine, SVM)^[81],主成分分析(Principle Component Analysis, PCA)^[82],字典学习(Dictionary Learning)^[83]等分类方法用于微动目标识别的研究。把几种分类方法优化结合,则可以进一步改善识别性能^[84]。随着研究的深入,还不断有其他范畴的方法被引入到微动目标识别领域,如将语音信号处理中的线性预测编码技术(Linear Predictive Coding, LPC)^[85]与动态时间规整(Dynamic Time Warping, DTW)技术^[86]用于微动目标分类,取得了较好的结果。

从应用上看,多年来微动目标识别技术取得了长足的进步,并一直朝着精细化方向发展,即从最初的判断目标有无,到分辨目标类型,再到现在识别目标具体型号与运动意图。尽管目前分类识别方法呈现出多层次与多样性,但不存在所谓的最优方法,识别性能的优劣需要根据特定的应用背景来确定。

6 典型前沿应用

基于微动特征的雷达目标识别技术在空间目标、空中目标与地海面目标的探测与分类识别领域已经吸引了大量研究人员的关注,其研究成果在空间监视、防空反导、战略预警、战场侦察、电子对抗、交通管制、建筑监测、反恐维稳、安保救援、临床医疗等军事和民用领域具有非常广阔的应用前景。下面就其中比较典型的应用及其面临的问题、可能的解决途径进行论述。

6.1 弹道目标识别

国外很早就开始了基于微动特征的弹道目标识别的研究,并且开展了大量的实验,目前,美国已经成功把利用微动特征识别威胁目标的相关算法和技术应用于已有装备^[87]。但由于军事保密等原因,国外的相关研究成果公开发表的很少。国内这方面起步相对较晚,但也已经取得了较多研究成果。然而从目前的研究现状来看,无论是基于高分辨宽带雷达还是低分辨窄带雷达,在由理论向应用转化的过程中仍面临许多问题:(1)诱饵与弹道目标的相似度越来越高,导致提取到的微动特征可分性降低;(2)反导作战对目标识别的实时性要求很高,而现有微动特征提取与成像方法往往依赖于对目标的长时间观测,难以满足集火攻击条件下的多目标识别需求;(3)弹道目标在突防过程中往往会实施各种无源和有源干扰,大幅增加了目标特征提取与识别的难度。

针对以上问题,首先可以考虑综合宽带雷达和窄带雷达组建混合体制雷达网,一方面混合体制的

组网雷达可以有效发挥抗干扰优势,极大地提高目标识别的性能;另一方面通过多通道协同处理,组网雷达不但可以实现群目标分辨、目标3维微动特征提取与3维成像,还能进行特征融合处理进一步提高目标识别的准确性和可靠性。其次考虑到弹道目标识别过程中观测时间的限制以及雷达宽窄带交替工作模式等因素导致的数据稀疏性,对已有稀疏观测条件下的微动特征提取与成像方法进行改进,能够增强目标识别的适应性的与鲁棒性。

6.2 海面舰船目标探测与识别

海面舰船目标在平动的同时自身姿态也随海水波动而变化,表现为可能同时存在的3维(俯仰、横滚、偏航)转动。而且,海面目标还会受到非线性策动力和非线性阻尼力的作用^[9],因此其运动形式十分复杂。海面舰船目标的检测一直是雷达信号处理领域的难题,微多普勒理论为海面目标的探测与识别问题提供了新的解决途径^[88,89]。但是由于目标处于海背景散射环境,目标与海面之间的相互电磁耦合作用改变了目标以及海面本身的散射特性,此时的海面电磁散射通常被视为海杂波,在整体雷达回波中,海杂波信号往往强于有用的目标散射信号,从而对目标微多普勒信号的获取与处理带来极大的困难,给海面目标探测与识别造成严重影响。因此,需要深入研究目标运动状态和回波特性之间的关系,进而设计相应的匹配增强和滤波算法,改善信杂比(Signal to Clutter Ratio, SCR),提高雷达对海探测性能。极化对于微动特征提取和增强具有重要的应用潜力^[90],通过提取微多普勒信号在极化域的信息,可以获得目标表面粗糙度、对称性和姿态取向等其它参数难以表征的信息,有望显著改善海面目标探测与识别能力。

6.3 人体微动特征提取与识别

人体目标是当前微动特征提取与识别领域的研究热点,相关研究内容主要包括人体与其他生物/

非生物体的分辨^[91,92]、人体步态识别^[93,94]以及人体生命特征(呼吸、心跳、脉搏等)探测^[95,96]等方面,其中许多成熟理论已经在医疗诊断、安全监控和自动驾驶等方面应用,并取得了较好的效果。

人体目标的RCS较小(约为 0.5 m^2),并且人体通常是在复杂噪声环境下进行慢速运动,其雷达回波,特别是其生命特征信号,往往弱于其他目标的回波,甚至可能被噪声淹没。因此,人体目标微动特征提取与识别首要解决的问题就是怎样将其微动信号从其他信号中区分开来。高频信号可以获得更大的微多普勒频移,比如太赫兹(Terahertz, THz)波不但可以获得高的空间分辨率,还具有强的穿透力,非常适合用于人体生命特征探测。

人体行走或跑步都是典型的非刚体较接式运动^[97],由于人体结构的复杂性以及在运动中身体各部分的强耦合性,其运动模式都是多种微动的复合,这种具有强耦合性的复合微多普勒特征很难进行参数化处理,微多普勒谱也极不规则。另外,如图5给出的暗室采集数据所示,不同人在同一种运动姿态(步行)的时频谱图的差异往往很小,这进一步增加了人体目标分类识别的难度。现有的微多普勒特征提取方法大多是通过雷达回波信号进行参数化描述提取特征、或者提取谱图的结构特征,这些特征的可分性和差异性不强,无法用于身份辨识或者人体步态特征的精细识别。基于深度学习的分类识别方法是解决上述问题的一条有效途径,通过构建合理描述人体微动信号差异和时序特性的深度神经网络模型,设计相应的学习策略和优化方法,有望大幅提升人体目标识别精度。我们的初步研究表明,利用预训练的卷积神经网络,对同一种运动姿态条件下的2人分类识别准确率能达到93%以上,4人分类识别准确率能达到72%以上。

7 总结与展望

微动目标的雷达特征提取、成像与识别研究延

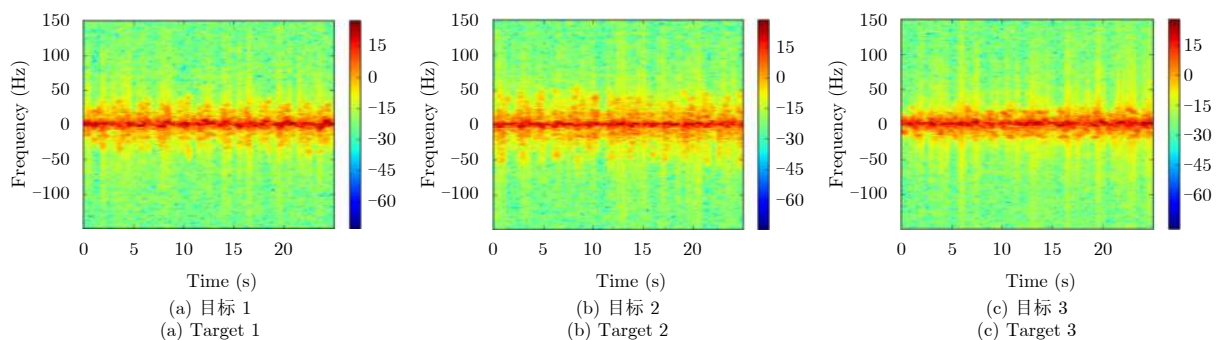


图 5 不同人步行姿态下获得的时频谱图(X波段)

Fig. 5 Time-frequency spectrum of different walking people (X band)

拓了目标回波信号的可用维度,为进一步提升雷达目标探测与识别能力提供了有力的技术支持。近年来,随着技术的不断突破和研究的不断深入,涌现出许多新的、有效的关于微动目标回波建模、特征提取、成像及分类识别的方法,并采用实测数据进行了验证,这些都是微动特征研究在雷达领域不断成熟的标志。但雷达目标微动特征提取、成像与识别毕竟是一个集电磁学、动力学、信号处理、模式识别等多个学科领域交叉结合的研究方向,还存在许多有待解决的问题,从现有研究状况分析,可以预计未来将在以下方面取得有价值的研究成果:

(1) 微动目标的极化特征

目标微动会在时域、频域、RCS和极化域对雷达回波造成复杂调制,目前国内外的研究主要集中在时域、频域、RCS这几个方面,而微动引起的极化调制少有研究。极化作为电磁波的本质属性,描述了电磁波的矢量特征,是电磁波除幅度、频率、相位以外的重要基本参量。回波的极化状态与目标的姿态、尺寸、结构、材料等物理属性密切相关,研究目标微动引起的回波极化调制,提取回波变极化效应所蕴含的丰富的目标物理属性信息有助于进一步提升雷达的分类和识别能力。国防科技大学王雪松教授团队就雷达目标极化信息的获取、处理及应用进行了大量的工作^[98],为微动目标的极化特征研究奠定了基础。

(2) 新兴频段的微多普勒效应

随着当前各种电磁用频活动的加剧,传统电磁波频段拥塞的现象日益严重,新兴频段开发研究的需求迫切。太赫兹波是电磁波谱上介于微波与红外光之间的电磁波,兼有微波毫米波与红外光两个频段的特性,其波长相对较小,适合于超大信号带宽和窄天线波束的实现,可获得目标的精细刻画,非常适于微多普勒效应研究。另外,太赫兹波还有优越的反隐形能力,较强的环境适应能力,低截获率,强抗干扰性和穿透等离子体能力等诸多优点,具有极大的应用潜力。目前,国外^[99]和国内^[96,100]都已经有了团队在开展对太赫兹频段微动目标的研究。

超声波也可用于目标微多普勒效应研究,尽管超声波传播速度慢、距离近,在大气中衰减也很快,但是它对多普勒频移敏感,例如对一个运动速度10 m/s的目标,只需要发射40 KHz的超声波就能观测到与发射34 GHz电磁波同样的多普勒频移。同时,超声波探测设备简便易携,工程造价远低于微波雷达,因此在室内等应用场景中完全可以替代雷达。事实上,国外已有研究证明了采用超声波探测微动目标的可行性^[91,101],但是国内还未见报道。

(3) 新体制雷达微动特征提取与成像

外辐射源雷达(无源雷达)通常采用第三方发射的非合作照射源(如民用卫星信号、广播信号、电视信号、民用移动通信信号以及Wi-Fi信号等)对目标进行探测与定位。该体制雷达无需频率分配,无发射装置,成本低,可以长时间相干积累,并且具有良好的“四抗”能力。利用外辐射源雷达探测微动目标,可为低空空域监视(如无人机、鸟类等目标的分类识别)提供新途径。

认知雷达是引入并模仿人类认知特性的新一代雷达系统,具有完善的接收和发射自适应特征,通过与环境的不断交互和学习,获取环境信息,结合先验知识和推理,不断地调整接收机和发射机参数,最终实现目标自适应探测,提高复杂、时变以及未知电磁环境与地理环境下的探测性能。可以预见,认知雷达技术将大幅提升微动目标特征提取及分类识别的效率与精度,并为实现目标检测、估计、成像、识别一体化提供强劲驱动力。

(4) 与人工智能技术的结合

近年来,随着计算机算力、存储设备水平与大数据分析能力的快速提升、人工智能等技术不断实现新的突破,特别是以深度学习、强化学习等为代表的人工智能算法在图像分类、语音识别、目标检测以及自然语言处理等领域取得了显著成果。相比传统方法,人工智能算法在性能表现上有着明显优势,例如在识别分类中,深度学习将特征提取与分类器结合到一个框架中,用数据去学习特征,在使用中减少了人工特征提取的巨大工作量,从而大幅提高了特征提取的效率^[102]。因此,人工智能技术的引入与结合势必为微动目标识别研究带来新的活力。

参考文献

- [1] 张群,罗迎. 雷达目标微多普勒效应[M]. 北京:国防工业出版社, 2013: 1-17.
Zhang Qun and Luo Ying. Micro-Doppler Effect of Radar Targets[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 1-17.
- [2] Zhang Q, Luo Y, and Chen Y A. Micro-Doppler Characteristics of Radar Targets[M]. Amsterdam: Elsevier, 2017: 1-11.
- [3] Chen V C. The Micro-Doppler Effect in Radar[M]. Boston, London: Artech House, 2011: 35-78.
- [4] Thayaparan T, Stanković L, and Djurović I. Micro-Doppler-based target detection and feature extraction in indoor and outdoor environments[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2008, 345(6): 700-722. DOI: 10.1016/j.jfranklin.2008.01.003.

- [5] Chen V C, Li F, Ho S S, *et al.*. Micro-Doppler effect in radar: Phenomenon, model, and simulation study[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2–21.
- [6] Liu L H, McLernon D, Ghogho M, *et al.*. Ballistic missile detection via micro-Doppler frequency estimation from radar return[J]. *Digital Signal Processing*, 2012, 22(1): 87–95. DOI: [10.1016/j.dsp.2011.10.009](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2011.10.009).
- [7] Chen V C. Doppler signatures of radar backscattering from objects with micro-motions[J]. *IET Signal Processing*, 2008, 2(3): 291–300. DOI: [10.1049/iet-spr:20070137](https://doi.org/10.1049/iet-spr:20070137).
- [8] 马梁, 刘进, 王涛, 等. 旋转对称目标滑动型散射中心的微 Doppler 特性[J]. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(5): 605–616. Ma Liang, Liu Jin, Wang Tao, *et al.*. Micro-Doppler characteristics of sliding-type scattering center on rotationally symmetric target[J]. *SCIENCE CHINA Information Sciences*, 2011, 54(9): 1957–1967. DOI: [10.1007/s11432-011-4254-3](https://doi.org/10.1007/s11432-011-4254-3).
- [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. DOI: [10.12000/JR15079](https://doi.org/10.12000/JR15079).
Chen Xiao-long, Dong Yun-long, Li Xiu-you, *et al.*. Modeling of micromotion and analysis of properties of rigid marine targets[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(6): 630–638. DOI: [10.12000/JR15079](https://doi.org/10.12000/JR15079).
- [10] 黄健, 李欣, 黄晓涛, 等. 基于微多普勒特征的坦克目标参数估计与身份识别[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1050–1055. DOI: [10.3724/SP.J.1146.2009.00669](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2009.00669).
Huang Jian, Li Xin, Huang Xiao-tao, *et al.*. Micro-Doppler features based parameter estimation and identification of tank[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(5): 1050–1055. DOI: [10.3724/SP.J.1146.2009.00669](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2009.00669).
- [11] 张翼, 程永强, 朱玉鹏, 等. 人体目标雷达回波建模[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(3): 438–445. DOI: [10.16182/j.cnki.joss.2011.03.018](https://doi.org/10.16182/j.cnki.joss.2011.03.018).
Zhang Yi, Cheng Yong-qiang, Zhu Yu-peng, *et al.*. Human target radar echo modeling[J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(3): 438–445. DOI: [10.16182/j.cnki.joss.2011.03.018](https://doi.org/10.16182/j.cnki.joss.2011.03.018).
- [12] Chen V C. Detection and analysis of human motion by radar[C]. Proceedings of 2008 IEEE Radar Conference, Rome, Italy, 2008: 1–4.
- [13] Ghaleb A, Vignaud L, and Nicolas J M. Micro-Doppler analysis of wheels and pedestrians in ISAR imaging[J]. *IET Signal Processing*, 2008, 2(3): 301–311. DOI: [10.1049/iet-spr:20070113](https://doi.org/10.1049/iet-spr:20070113).
- [14] Zhang Q, Zeng Y S, He Y Q, *et al.*. Avian detection and identification with high-resolution radar[C]. Proceedings of 2008 IEEE Radar Conference, Rome, Italy, 2008: 1–6.
- [15] Zhu F, Luo Y, Zhang Q, *et al.*. ISAR imaging for avian species identification with frequency-stepped chirp signals[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(1): 151–155. DOI: [10.1109/LGRS.2009.2028902](https://doi.org/10.1109/LGRS.2009.2028902).
- [16] Bai X R, Zhou F, and Bao Z. High-resolution 3-D imaging of group rotating targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(2): 1066–1077. DOI: [10.1109/TAES.2013.110750](https://doi.org/10.1109/TAES.2013.110750).
- [17] Liu Y X, Chen H Y, Li X, *et al.*. Radar micro-motion target resolution[C]. Proceedings of 2006 CIE International Conference on Radar, Shanghai, China, 2006: 1411–1414.
- [18] Zhao M M, Zhang Q, Luo Y, *et al.*. Micromotion feature extraction and distinguishing of space group targets[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(2): 174–178. DOI: [10.1109/LGRS.2016.2633426](https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2633426).
- [19] Fioranelli F, Ritchie M, and Griffiths H. Multistatic human micro-Doppler classification of armed/unarmed personnel[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(7): 857–865. DOI: [10.1049/iet-rsn.2014.0360](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2014.0360).
- [20] 罗迎, 张群, 朱仁飞, 等. 多载频 MIMO 雷达中目标旋转部件三维微动特征提取方法[J]. 电子学报, 2011, 39(9): 1975–1981.
Luo Ying, Zhang Qun, Zhu Ren-fei, *et al.*. Three-dimensional micro-motion feature extraction of target with rotating parts in multi-carrier MIMO radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(9): 1975–1981.
- [21] Luo Y, Zhang Q, Qiu C W, *et al.*. Three-dimensional micromotion signature extraction of rotating targets in OFDM-LFM MIMO radar[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2013, 140: 733–759. DOI: [10.2528/PIER13042202](https://doi.org/10.2528/PIER13042202).
- [22] Luo Y, Zhang Q, Yuan N, *et al.*. Three-dimensional precession feature extraction of space targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(2): 1313–1329. DOI: [10.1109/TAES.2014.110545](https://doi.org/10.1109/TAES.2014.110545).
- [23] Zhang Q, Yeo T S, Tan H S, *et al.*. Imaging of a moving target with rotating parts based on the Hough transform[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 291–299. DOI: [10.1109/TGRS.2007.907105](https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.907105).
- [24] Xing M, Wu R, and Bao Z. High resolution ISAR imaging of high speed moving targets[J]. *IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2005, 152(2): 58–67. DOI: [10.1049/ip-rsn:20045084](https://doi.org/10.1049/ip-rsn:20045084).
- [25] Bai X R, Zhou F, Xing M D, *et al.*. High resolution ISAR imaging of targets with rotating parts[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 2011, 47(4): 2530–2543. DOI: [10.1109/TAES.2011.6034649](https://doi.org/10.1109/TAES.2011.6034649).

- [26] Peng B, Wei X Z, Deng B, *et al.* A Sinusoidal frequency modulation Fourier transform for radar-based vehicle vibration estimation[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, 63(9): 2188–2199. DOI: [10.1109/TIM.2014.2308031](https://doi.org/10.1109/TIM.2014.2308031).
- [27] He Q F, Zhang Q, Luo Y, *et al.* Sinusoidal frequency modulation Fourier-Bessel series for multicomponent SFM signal estimation and separation[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 2017: 5852171.
- [28] Suresh P, Thayaparan T, Obulesu T, *et al.* Extracting micro-Doppler radar signatures from rotating targets using Fourier-Bessel transform and time-frequency analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(6): 3204–3210. DOI: [10.1109/TGRS.2013.2271706](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2271706).
- [29] Suresh P, Thayaparan T, and Venkataramaniam K. Fourier-Bessel transform and time-frequency-based approach for detecting manoeuvring air target in sea-clutter[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(5): 481–491.
- [30] 冯德军, 陈志杰, 王雪松, 等. 基于一维距离像的导弹目标运动特征提取方法[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(6): 43–47. DOI: [10.3969/j.issn.1001-2486.2005.06.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2486.2005.06.010).
Feng De-jun, Chen Zhi-jie, Wang Xue-song, *et al.* A method for extracting moving feature of ballistic missile targets from high resolution range profiles[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2005, 27(6): 43–47. DOI: [10.3969/j.issn.1001-2486.2005.06.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2486.2005.06.010).
- [31] 马梁, 王涛, 冯德军, 等. 旋转目标距离像长度特性及微运动特征提取[J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2273–2279. DOI: [10.3321/j.issn:0372-2112.2008.12.001](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2008.12.001).
Ma Liang, Wang Tao, Feng De-jun, *et al.* The characteristic of range profile and micro-motion feature extraction for rotary target[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(12): 2273–2279. DOI: [10.3321/j.issn:0372-2112.2008.12.001](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2008.12.001).
- [32] 雷腾, 刘进忙, 余付平, 等. 基于时间-距离像的弹道目标进动特征提取新方法[J]. 信号处理, 2012, 28(1): 73–79. DOI: [10.3969/j.issn.1003-0530.2012.01.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2012.01.011).
Lei Teng, Liu Jin-mang, Yu Fu-ping, *et al.* A new precession signature extraction method of ballistic target based on range-profile[J]. *Signal Processing*, 2012, 28(1): 73–79. DOI: [10.3969/j.issn.1003-0530.2012.01.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2012.01.011).
- [33] 毕莉, 赵锋, 高勋章, 等. 基于一维像序列的进动目标尺寸估计研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(8): 1825–1830. DOI: [10.3724/SP.J.1146.2009.00835](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2009.00835).
Bi Li, Zhao Feng, Gao Xun-zhang, *et al.* Study on precessional target's dimension estimation based on HRRPs[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(8): 1825–1830. DOI: [10.3724/SP.J.1146.2009.00835](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2009.00835).
- [34] Rihaczek A W and Hershkowitz S J. Theory and Practice of Radar Target Identification[M]. Boston, London: Artech House, 2000.
- [35] Ai X F, Zou X H, Li Y Z, *et al.* Bistatic scattering centres of cone-shaped targets and target length estimation[J]. *SCIENCE CHINA Information Sciences*, 2012, 55(12): 2888–2898. DOI: [10.1007/s11432-012-4749-6](https://doi.org/10.1007/s11432-012-4749-6).
- [36] 艾小锋, 邹小海, 李浩智, 等. T/R-R双基地雷达进动目标参数估计与ISAR成像[J]. 电子学报, 2012, 40(6): 1148–1153. DOI: [10.3969/j.issn.0372-2112.2012.06.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2012.06.013).
Ai Xiao-feng, Zou Xiao-hai, Li Hao-zhi, *et al.* Parameter estimation and ISAR imaging of precession targets using T/R-R bistatic radars[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(6): 1148–1153. DOI: [10.3969/j.issn.0372-2112.2012.06.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2012.06.013).
- [37] 金光虎, 高勋章, 黎湘, 等. 基于ISAR像序列的弹道目标进动特征提取[J]. 电子学报, 2010, 38(6): 1233–1238.
Jin Guang-hu, Gao Xun-zhang, Li Xiang, *et al.* Precession feature extraction of ballistic targets based on dynamic ISAR image sequence[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(6): 1233–1238.
- [38] 陈蓉, 冯存前, 贺思三, 等. 采用ISAR像估计弹道目标微动特征的方法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(7): 1500–1505. DOI: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.07.11](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.07.11).
Chen Rong, Feng Cun-qian, He Si-san, *et al.* Micro-motion features estimation method using ISAR images for ballistic targets[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(7): 1500–1505. DOI: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.07.11](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.07.11).
- [39] Donoho D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289–1306. DOI: [10.1109/TIT.2006.871582](https://doi.org/10.1109/TIT.2006.871582).
- [40] 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 Kang-le. Research on feature extraction and parameters estimation for radar targets with micro-motions[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2010.
- [41] Whiteloni N and Ling H. Radar signature analysis using a joint time-frequency distribution based on compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(2): 755–763. DOI: [10.1109/TAP.2013.2291893](https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2291893).
- [42] Deprem Z and Çetín A. Cross-term-free time-frequency distribution reconstruction via lifted projections[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(1): 479–491. DOI: [10.1109/TAES.2014.140080](https://doi.org/10.1109/TAES.2014.140080).
- [43] Liu H C, Jiu B, Liu H W, *et al.* A novel ISAR imaging

- algorithm for micromotion targets based on multiple sparse bayesian learning[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(10): 1772–1776. DOI: [10.1109/LGRS.2014.2308536](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2308536).
- [44] Luo Y, Zhang Q, Qiu C W, *et al.* Micro-Doppler feature extraction for wideband imaging radar based on complex image orthogonal matching pursuit decomposition[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2013, 7(8): 914–924.
- [45] 张栋, 冯存前, 贺思三, 等. 组网雷达弹道目标三维进动特征提取[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2015, 42(2): 146–151. DOI: [10.3969/j.issn.1001-2400.2015.02.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2015.02.024).
- Zhang Dong, Feng Cun-qian, He Si-san, *et al.* Extraction of three-dimensional precession features of ballistic targets in netted radar[J]. *Journal of Xidian University*, 2015, 42(2): 146–151. DOI: [10.3969/j.issn.1001-2400.2015.02.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2015.02.024).
- [46] 赵双, 鲁卫红, 冯存前, 等. 基于窄带雷达网的弹道目标三维进动特征提取[J]. 雷达学报, 2017, 6(1): 98–105. DOI: [10.12000/JR15129](https://doi.org/10.12000/JR15129).
- Zhao Shuang, Lu Wei-hong, Feng Cun-qian, *et al.* Three-dimensional precession feature extraction of ballistic targets based on narrowband radar network[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(1): 98–105. DOI: [10.12000/JR15129](https://doi.org/10.12000/JR15129).
- [47] Hu J, Zhang Q, Luo Y, *et al.* Three-dimensional interferometric imaging and precession feature extraction of space targets in wideband radar[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2018, 12(1): 016029.
- [48] 黎湘, 高勋章, 刘永祥. 复杂运动目标ISAR成像技术进展与展望[J]. 数据采集与处理, 2014, 29(4): 508–515. DOI: [10.3969/j.issn.1004-9037.2014.04.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9037.2014.04.004).
- Li Xiang, Gao Xun-zhang, and Liu Yong-xiang. Research advances in ISAR imagery of complex motion target[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2014, 29(4): 508–515. DOI: [10.3969/j.issn.1004-9037.2014.04.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9037.2014.04.004).
- [49] Sato T. Shape estimation of space debris using single-range Doppler interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(2): 1000–1005. DOI: [10.1109/36.752218](https://doi.org/10.1109/36.752218).
- [50] Wang Q, Xing M D, Lu G Y, *et al.* Single range matching filtering for space debris radar imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(4): 576–580. DOI: [10.1109/LGRS.2007.903059](https://doi.org/10.1109/LGRS.2007.903059).
- [51] 张磊, 李亚超, 刘燕, 等. 基于时频特性的窄带高速自旋目标运动估计及成像算法[J]. 中国科学: 信息科学, 2010, 40(6): 863–875.
- Zhang Lei, Li Ya-chao, Liu Yan, *et al.* Time-frequency characteristics based motion estimation and imaging for high speed spinning targets via narrowband waveforms[J]. *SCIENTIA SINICA Information Sciences*, 2010, 53(8): 1628–1640. DOI: [10.1007/s11432-010-4027-4](https://doi.org/10.1007/s11432-010-4027-4).
- [52] Ding X F, Fan M M, Wei X Z, *et al.* Narrowband imaging method for spatial precession cone-shaped targets[J]. *SCIENCE CHINA Technological Sciences*, 2010, 53(4): 942–949. DOI: [10.1007/s11431-010-0112-6](https://doi.org/10.1007/s11431-010-0112-6).
- [53] 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. DOI: [10.3969/j.issn.1003-0530.2010.05.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2010.05.002).
- Ding Xiao-feng, Yao Hui-wei, Fan Mei-mei, *et al.* Narrowband imaging for spatial rotating targets based on tomography algorithm[J]. *Signal Processing*, 2010, 26(5): 648–653. DOI: [10.3969/j.issn.1003-0530.2010.05.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2010.05.002).
- [54] 雷腾, 刘进忙, 李松, 等. 基于MP稀疏分解的弹道中段目标微动ISAR成像新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(12): 2649–2654. DOI: [10.3969/j.issn.1001-506X.2011.12.15](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2011.12.15).
- Lei Teng, Liu Jin-mang, Li Song, *et al.* A novel ISAR imaging method of ballistic midcourse targets based on MP sparse decomposition[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(12): 2649–2654. DOI: [10.3969/j.issn.1001-506X.2011.12.15](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2011.12.15).
- [55] Zou F, Fu Y W, and Jiang W D. Micro-motion effect in inverse synthetic aperture radar imaging of ballistic mid-course targets[J]. *Journal of Central South University*, 2012, 19(6): 1548–1577. DOI: [10.1007/s11771-012-1175-2](https://doi.org/10.1007/s11771-012-1175-2).
- [56] Kang W W, Zhang Y H, and Dong X. Micro-Doppler effect removal for ISAR imaging based on bivariate variational mode decomposition[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12(1): 74–81. DOI: [10.1049/iet-rsn.2017.0104](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2017.0104).
- [57] Yuan B, Chen Z P, and Xu S Y. Micro-Doppler analysis and separation based on complex local mean decomposition for aircraft with fast-rotating parts in ISAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(2): 1285–1298. DOI: [10.1109/TGRS.2013.2249588](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2249588).
- [58] Stanković L, Orović I, Stanković S, *et al.* Compressive sensing based separation of nonstationary and stationary signals overlapping in time-frequency[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(18): 4562–4572. DOI: [10.1109/TSP.2013.2271752](https://doi.org/10.1109/TSP.2013.2271752).
- [59] Wang Q, Xing M D, Lu G Y, *et al.* High-resolution three-dimensional radar imaging for rapidly spinning targets[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 22–30. DOI: [10.1109/TGRS.2007.909086](https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.909086).
- [60] Xing M D, Wang Q, Wang G Y, *et al.* A matched-filter-bank-based 3-D imaging algorithm for rapidly spinning targets[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(7): 2106–2113. DOI: [10.1109/TGRS.2008.2010499](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2010499).
- [61] Zhang L, Xing M D, Qiu C W, *et al.* Two-dimensional spectrum matched filter banks for high-speed spinning-

- target three-dimensional ISAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(3): 368–372. DOI: [10.1109/LGRS.2009.2013487](https://doi.org/10.1109/LGRS.2009.2013487).
- [62] Bai X R, Xing M D, Zhou F, *et al.* High-resolution three-dimensional imaging of spinning space debris[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(7): 2352–2362. DOI: [10.1109/TGRS.2008.2010854](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2010854).
- [63] Bai X R and Bao Z. Imaging of rotation-symmetric space targets based on electromagnetic modeling[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(3): 1680–1689. DOI: [10.1109/TAES.2014.120772](https://doi.org/10.1109/TAES.2014.120772).
- [64] Bai X R and Bao Z. High-resolution 3D imaging of precession cone-shaped targets[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(8): 4209–4219. DOI: [10.1109/TAP.2014.2329004](https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2329004).
- [65] Bai X R, Zhou F, and Bao Z. High-resolution three-dimensional imaging of space targets in micromotion[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(7): 3428–3440. DOI: [10.1109/JSTARS.2015.2431119](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2431119).
- [66] Ai X F, Huang Y, Zhao F, *et al.* Imaging of spinning targets via narrow-band T/R-R bistatic radars[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(2): 362–366. DOI: [10.1109/LGRS.2012.2205893](https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2205893).
- [67] 梁必帅, 张群, 娄昊, 等. 基于微动特征关联的空间非对称自旋目标雷达三维成像方法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(6): 1381–1388. DOI: [10.3724/SP.J.1146.2013.01147](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01147).
Liang Bi-shuai, Zhang Qun, Lou Hao, *et al.* A method of three-dimensional imaging based on micro-motion feature association for spatial asymmetrical spinning targets[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(6): 1381–1388. DOI: [10.3724/SP.J.1146.2013.01147](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01147).
- [68] 梁必帅, 张群, 娄昊, 等. 基于微动特征关联的空间自旋目标宽带雷达三维成像[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(9): 2133–2140. DOI: [10.3724/SP.J.1146.2012.01537](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.01537).
Liang Bi-shuai, Zhang Qun, Lou Hao, *et al.* Three-dimensional broadband radar imaging of space spinning targets based on micro-motion parameter correlation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(9): 2133–2140. DOI: [10.3724/SP.J.1146.2012.01537](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.01537).
- [69] Sun Y X, Luo Y, Zhang Q, *et al.* Time-varying three-dimensional interferometric imaging for space rotating targets with stepped-frequency chirp signal[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(9): 1397–1405. DOI: [10.1049/iet-rsn.2017.0009](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2017.0009).
- [70] Gschwendtner A B and Keicher W E. Development of coherent laser radar at Lincoln Laboratory[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2000, 12(2): 383–396.
- [71] Lei J J and Lu C. Target classification based on micro-Doppler signatures[C]. Proceedings of 2005 IEEE International Radar Conference, Arlington, VA, USA, 2005: 179–183.
- [72] Nanzer J A and Rogers R L. Bayesian classification of humans and vehicles using micro-Doppler signals from a Scanning-beam radar[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2009, 19(5): 338–340. DOI: [10.1109/LMWC.2009.2017620](https://doi.org/10.1109/LMWC.2009.2017620).
- [73] Lin Y and Le Kerneec J. Performance analysis of classification algorithms for activity recognition using micro-Doppler feature[C]. Proceedings of the 13th International Conference on Computational Intelligence and Security, Hong Kong, China, 2017: 480–483.
- [74] Smith G E, Woodbridge K, and Baker C J. Template based micro-Doppler signature classification[C]. 2006 European Radar Conference, Manchester, UK, 2006: 158–161.
- [75] 李开明, 张群, 罗迎, 等. 地面车辆目标识别研究综述[J]. *电子学报*, 2014, 42(3): 538–546. DOI: [10.3969/j.issn.0372-2112.2014.03.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2014.03.018).
Li Kai-ming, Zhang Qun, Luo Ying, *et al.* Review of ground vehicles recognition[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(3): 538–546. DOI: [10.3969/j.issn.0372-2112.2014.03.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2014.03.018).
- [76] 王晓丹, 王积勤. 雷达目标识别技术综述[J]. *现代雷达*, 2003, 25(5): 22–26. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7859.2003.05.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2003.05.007).
Wang Xiao-dan and Wang Ji-qin. A survey of radar target recognition technique[J]. *Modern Radar*, 2003, 25(5): 22–26. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7859.2003.05.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2003.05.007).
- [77] Van Eeden W D, De Villiers J P, Berndt R J, *et al.* Micro-Doppler radar classification of humans and animals in an operational environment[J]. *Expert Systems with Applications*, 2018, 102: 1–11. DOI: [10.1016/j.eswa.2018.02.019](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.02.019).
- [78] Bilik I and Khomchuk P. Minimum divergence approaches for robust classification of ground moving targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(1): 581–603. DOI: [10.1109/TAES.2012.6129657](https://doi.org/10.1109/TAES.2012.6129657).
- [79] Graley J, Murray T S, Mendat D R, *et al.* Action recognition using micro-Doppler signatures and a recurrent neural network[C]. Proceedings of the 51st Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS), Baltimore, MD, USA, 2017: 1–5.
- [80] Lan J H, Zhang Z H, and Xiong S. Acoustic detection for vehicle targets and recognition by data fusion[C]. Proceedings of 2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, Ottawa, Canada, 2005: 551–553.
- [81] Yang L, Li G, Ritchie M, *et al.* Gait classification based

- on micro-Doppler features[C]. Proceedings of 2016 CIE International Conference on Radar, Guangzhou, China, 2016: 1–4.
- [82] Zabalza J, Clemente C, Di Caterina G, *et al.* Robust PCA micro-Doppler classification using SVM on embedded systems[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(3): 2304–2310. DOI: [10.1109/TAES.2014.130082](https://doi.org/10.1109/TAES.2014.130082).
- [83] Vishwakarma S and Ram S S. Dictionary learning for classification of indoor micro-Doppler signatures across multiple carriers[C]. Proceedings of 2017 IEEE Radar Conference, Seattle, WA, USA, 2017: 0992–0997. DOI: [10.1109/RADAR.2017.7944348](https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944348).
- [84] 方菲菲, 余稳. 基于PCA-LDA-SVM的多普勒雷达车型识别算法[J]. *数据采集与处理*, 2012, 27(1): 111–116. DOI: [10.3969/j.issn.1004-9037.2012.01.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9037.2012.01.019).
Fang Fei-fei and Yu Wen. Vehicle recognition algorithm with doppler radar based on PCA-LDA-SVM[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2012, 27(1): 111–116. DOI: [10.3969/j.issn.1004-9037.2012.01.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9037.2012.01.019).
- [85] Javier R J and Kim Y. Application of linear predictive coding for human activity classification based on micro-Doppler signatures[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(10): 1831–1834. DOI: [10.1109/LGRS.2014.2311819](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2311819).
- [86] Smith G E, Woodbridge K, and Baker C J. Radar micro-Doppler signature classification using dynamic time warping[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(3): 1078–1096. DOI: [10.1109/TAES.2010.5545175](https://doi.org/10.1109/TAES.2010.5545175).
- [87] 冯存前, 李靖卿, 贺思三, 等. 组网雷达中弹道目标微动特征提取与识别综述[J]. *雷达学报*, 2015, 4(6): 609–620. DOI: [10.12000/JR15084](https://doi.org/10.12000/JR15084).
Feng Cun-qian, Li Jing-qing, He Si-san, *et al.* Micro-Doppler feature extraction and recognition based on netted radar for ballistic targets[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(6): 609–620. DOI: [10.12000/JR15084](https://doi.org/10.12000/JR15084).
- [88] Chen X L, Guan J, Li X Y, *et al.* Effective coherent integration method for marine target with micromotion via phase differentiation and radon-Lv's distribution[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(9): 1284–1295. DOI: [10.1049/iet-rsn.2015.0100](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0100).
- [89] Chen X L, Guan J, Bao Z H, *et al.* Detection and extraction of target with micromotion in spiky sea clutter via short-time fractional Fourier transform[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(2): 1002–1018. DOI: [10.1109/TGRS.2013.2246574](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2246574).
- [90] 孙挺, 程旭. 一种基于全极化回波的微多普勒增强算法[J]. *电子学报*, 2017, 45(9): 2071–2076. DOI: [10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.003).
Sun Ting and Cheng Xu. A novel method of micro-Doppler signature enhancement based on full polarization echoes[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(9): 2071–2076. DOI: [10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.003).
- [91] Damarla T, Bradley M, Mehmood A, *et al.* Classification of animals and people ultrasonic signatures[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(5): 1464–1472. DOI: [10.1109/JSEN.2012.2236550](https://doi.org/10.1109/JSEN.2012.2236550).
- [92] Shi X R, Zhou F, Liu L, *et al.* Textural feature extraction based on time-frequency spectrograms of humans and vehicles[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(9): 1251–1259. DOI: [10.1049/iet-rsn.2014.0432](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2014.0432).
- [93] Amin M G, Ahmad F, Zhang Y D, *et al.* Human gait recognition with cane assistive device using quadratic time-frequency distributions[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(9): 1224–1230. DOI: [10.1049/iet-rsn.2015.0119](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0119).
- [94] Saho K, Fujimoto M, Masugi M, *et al.* Gait classification of young adults, elderly non-fallers, and elderly fallers using micro-Doppler radar signals: Simulation study[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(8): 2320–2321. DOI: [10.1109/JSEN.2017.2678484](https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2678484).
- [95] Mikhelson I V, Bakhtiari S, Elmer II T W, *et al.* Remote sensing of heart rate and patterns of respiration on a stationary subject using 94-GHz millimeter-wave interferometry[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2011, 58(6): 1671–1677. DOI: [10.1109/TBME.2011.2111371](https://doi.org/10.1109/TBME.2011.2111371).
- [96] Xu Z W, Wu Y J, and Lu X Q. Time-frequency analysis of terahertz radar signal for vital signs sensing based on radar sensor[J]. *International Journal of Sensor Networks*, 2013, 13(4): 241–253. DOI: [10.1504/IJSNET.2013.055587](https://doi.org/10.1504/IJSNET.2013.055587).
- [97] Chen V C. Radar micro-Doppler signatures-principle and applications[J]. *Radar Science and Technology*, 2012, 10(3): 231–240.
- [98] 王雪松. 雷达极化技术研究现状与展望[J]. *雷达学报*, 2016, 5(2): 119–131. DOI: [10.12000/JR16039](https://doi.org/10.12000/JR16039).
Wang Xuesong. Status and prospects of radar polarimetry techniques[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(2): 119–131. DOI: [10.12000/JR16039](https://doi.org/10.12000/JR16039).
- [99] Petkie D T, Bryan E, Benton C, *et al.* Remote respiration and heart rate monitoring with millimeter-wave/terahertz radars[C]. Proceedings of SPIE 7117, Millimetre Wave and Terahertz Sensors and Technology, Cardiff, Wales, United Kingdom, 2008, 7117: 71170I. DOI: [10.1117/12.800356](https://doi.org/10.1117/12.800356).
- [100] 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.12000/JR17087).

- [101] Mehmood A, Sabatier J M, Bradley M, *et al.* Extraction of the velocity of walking human's body segments using

ultrasonic Doppler[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2010, 128(5): EL316. DOI: [10.1121/1.3501115](https://doi.org/10.1121/1.3501115).

- [102] Lecun Y, Bengio Y, and Hinton G. Deep learning[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 436–444. DOI: [10.1038/nature14539](https://doi.org/10.1038/nature14539).

作者简介



张 群(1964–), 男, 陕西合阳人, 现为空军工程大学信息与导航学院教授, 博士生导师, IEEE高级会员, 中国电子学会无线电定位技术分会委员, 研究方向为雷达成像与目标识别及电子对抗等。

E-mail: zhangqunnus@gmail.com



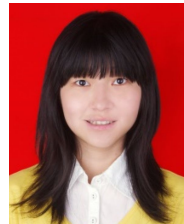
罗 迎(1984–), 男, 湖南益阳人, 现为空军工程大学信息与导航学院副教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像与目标识别。

E-mail: luoying2002521@163.com



胡 健(1986–), 男, 陕西商洛人, 现为空军工程大学信息与导航学院博士研究生, 研究方向为雷达成像与雷达目标微多普勒效应。

E-mail: hujianinstar@163.com



陈怡君(1989–), 女, 陕西西安人, 现为武警工程大学信息工程学院讲师, 研究方向为认知成像与目标识别。

E-mail: cheniyun519@126.com