

弹道目标雷达微动特征提取与识别研究综述

李开明^{1,2}, 代肖楠^{1,3}, 罗迎^{1,2}, 张群^{1,2}

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077;
2. 信息感知技术协同创新中心, 西安, 710077; 3. 95806 部队, 北京, 100076)

摘要 弹道目标雷达微动特征提取与识别是雷达目标识别领域的重要研究方向之一。在简要阐述弹道目标识别重要研究价值的基础上, 结合国内外研究现状, 从点散射模型、滑动散射模型、属性散射中心模型等出发, 总结了现有的弹道目标微动回波建模方法, 进一步分别从单基、双基、多基等不同雷达观测视角出发, 梳理了弹道目标微动特征提取与成像方法, 对基于人工特征和传统分类器、及基于深度学习的弹道目标分类识别方法进行了总结, 最后对弹道目标雷达微动特征提取与识别方向的技术难点和未来发展趋势进行了分析与展望。

关键词 弹道目标; 微动; 特征提取; 目标识别

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.01.002

中图分类号 TN95 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)01-0007-11

Review of Radar Micro-Motion Feature Extraction and Recognition for Ballistic Targets

LI Kaiming^{1,2}, DAI Xiaonan^{1,3}, LUO Ying^{1,2}, ZHANG Qun^{1,2}

(1. Information and Navigation School, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. Collaborative Innovation Center of Information Sensing and Understanding, Xi'an 710077, China;
3. Unit 95806, Beijing 100076, China)

Abstract Micro-motion feature extraction and recognition of ballistic targets is one of the important research directions in the field of radar targets recognition. On the basis of a brief description of the important research value of ballistic target recognition, combined with the research status at home and abroad, this paper firstly summarizes the echoes modeling methods of ballistic targets from the point scattering model, sliding scattering model, attribute scattering center model, etc., and then summarizes the micro-motion feature extraction and imaging methods of ballistic targets from different radar observation perspectives such as monostatic radar, bistatic radar and multistatic radar. Thirdly, the classification and recognition methods of ballistic targets are summarized, which mainly based on artificial features and traditional classifiers or the deep learning. Finally, the technical difficulties and future development trends of this research direction are analyzed and forecasted.

Key words ballistic targets; micro-motion; feature extraction; target recognition

收稿日期: 2022-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(61971434, 62131020, 61871396)

作者简介: 李开明(1982—), 男, 山西应县人, 副教授, 博士(后), 硕士生导师, 研究方向为雷达成像与目标识别。

E-mail: likaiming 1982@163.com

引用格式: 李开明, 代肖楠, 罗迎, 等. 弹道目标雷达微动特征提取与识别研究综述[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(1): 7-17. LI Kaiming, DAI Xiaonan, LUO Ying, et al. Review of Radar Micro-Motion Feature Extraction and Recognition for Ballistic Targets[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(1): 7-17.

随着世界高新军事技术的飞速发展,弹道导弹成为左右战场态势、决定战争走向的“杀手锏”武器^[1-8],弹道导弹识别与防御也成为关系国土防空安全的关键战略性问题。

弹道导弹突防时通常会释放大量假目标、诱饵和干扰装置,同时伴随有箔条、碎片等,形成复杂的弹道群目标。真假弹头目标识别是国际公认的技术难题之一,现有的弹道导弹目标识别技术主要包括轨道特征识别技术、姿态特征识别技术、结构特征识别技术、质阻比识别技术、基于雷达散射截面(radar cross section, RCS)的识别技术、极化特征识别技术、信息融合识别技术等^[1-5]。随着电磁控制技术的发展和诱饵制作水平的提高,使得基于表面材料特征和结构形状特征的弹头和诱饵的可分性降低,利用 RCS 特征、极化特征等,难以从诱饵等干扰目标中识别出真弹头;而由于有效载荷的限制,诱饵和弹头等目标的质量分布特征不同,这样会导致不同目标的运动特征存在明显差异。运动特征是弹道目

标识别的重要依据,已得到国内外雷达技术研究人员的普遍认同^[1-9]。

2000 年,美国海军实验室的 V. C. Chen 将目标或目标的组成部分除质心平动以外的振动、转动、加速等微小运动统称为微动(micro-motion 或 micro-dynamic)^[4]。微动会对目标回波产生附加的频率调制,使其多普勒谱展宽,这种现象称为微多普勒效应(micro-Doppler effect, m-D effect)^[4-5]。微动特征被认为是目标独特的特征,可以用来确定目标的属性,实现对目标的分类与识别。

典型的弹道导弹目标以光滑的圆锥体或锥柱体为主,进入中段后,弹头为保持姿态稳定,通常会发生自旋,头体分离后,由于受到扰动,弹头在自旋的同时会产生小角度的锥旋,称为进动。而假目标、充气诱饵将发生章动、摆动等,燃料箱、碎片、重金属球诱饵等受重力作用将发生翻滚^[1-8]。图 1 为美国“民兵-III”弹道导弹弹头及部分诱饵照片。

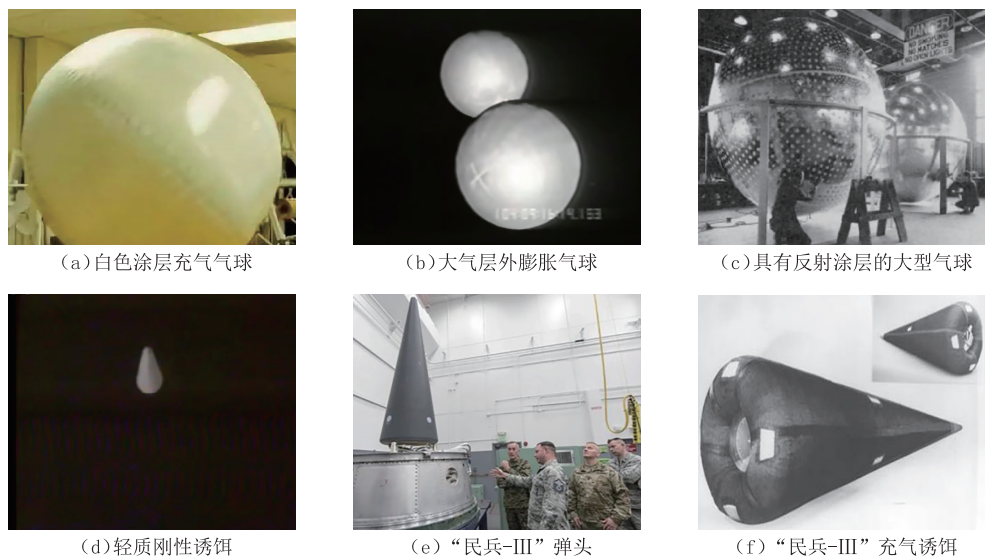


图 1 美国“民兵-III”弹道导弹弹头及部分诱饵

弹道目标的自旋、进动、章动、摆动、翻滚等都是典型的微动^[1-8]。近年来,对雷达目标微动状态的精细描述与刻画成为雷达信号处理的研究热点之一,利用高分辨雷达和现代信号处理技术对弹道目标的微动及成像特征进行分析提取,可作为弹道目标识别的重要依据,为弹道导弹目标的分类识别提供了新的技术途径^[3-9]。

早在 1990 年,美国就开展了 2 次被称为“Fire-fly”的试验,利用“Filepond”激光雷达成功观测到可控锥体气球的展开、膨胀及其模拟的几种不同的进动过程,验证了使用微动特性进行弹头目标识别的可行性^[10]。此外,美国装备的舰载 S 波段相控阵雷达 AN/SPY-1 和地基 THAAD GBR X 波段雷达均已使用了微动相关算法和技术^[11-12]。

自从“微多普勒效应”被提出以来,弹道目标的微动特性研究受到国内外科科研机构、工程技术人员和专家学者的广泛关注,并取得了丰富的研究成果^[1-21]。本文从技术的角度,针对弹道目标微动回波建模、微动特征提取与成像以及分类识别方法 3 个方面进行总结梳理,最后对弹道目标微动特征提取与识别的技术难点和发展趋势进行了分析展望。

1 弹道目标微动回波建模

弹道目标是比较特殊的一类空间目标,通常是旋转对称体,即绕对称轴的旋转不改变目标外形。弹道导弹外形的基本 4 种类型^[13]分别为平底锥、圆底锥、平底锥柱头体和圆底锥柱头体。

在高频雷达照射下,弹道导弹这类目标总的电磁散射可以认为是由某些局部位置上的电磁散射所合成的,即等效多散射中心^[13]。现有的弹道目标微动回波模型大多基于点散射模型展开,V. C. Chen最早对振动、旋转、翻滚和锥旋4种典型微动及其微多普勒效应进行了建模分析^[14]。T. Thayaparan等人利用角反射器外场测试实验,得到了与理论推导相同的结论,进一步验证了基于点散射模型进行微动回波建模的正确性和可行性^[15]。文献[16]分别从弹头和诱饵运动特性出发,在国内较早建立了诱饵摆动的微动回波模型,并与弹头进动产生的微多普勒特征进行了对比分析,文献[17]也开展了弹头、诱饵和燃料箱等弹道目标的建模研究。

上述模型均是在理想散射点假设条件下建立的,考虑到目标散射点的电磁散射各向异性及遮挡效应的存在,实际情况下散射中心的运动规律与弹道目标本身的运动规律并不完全相同。国防科技大学的马梁博士对弹体不同位置散射中心的微运动特性进行了建模,推导了边缘(棱线)型滑动型散射中心微多普勒的数学表达式,得出了滑动散射点微多普勒的非正弦变化规律,并通过暗室动态测量实验得到了与理论分析一致的结果^[18]。国防科技大学的金光虎博士提出了中段目标的移动散射点模型概念,对无翼弹头、伴飞锥形诱饵和有翼弹头及翼的遮挡效应进行了分析仿真^[19]。文献[20]在此基础上推导了移动散射点的回波模型和微多普勒模型,并进行了仿真验证。文献[21]在分析实际散射中心的非理想散射现象和遮挡效应的基础上,建立了基于非理想散射中心的中段进动目标回波模型。

近年来,基于属性散射中心的弹道目标回波建模与分析受到关注。属性散射中心模型是根据实际中电磁波的几何绕射和物理光学理论而提出的一种散射中心模型,通过将散射中心区分为局部散射中心和分布散射中心,能够表征散射中心的形状、长度及姿态等信息,对散射中心的描述更加精细^[22]。文献[23]对传统属性散射中心模型中的方位依赖关系进行了修正,改进后的模型能够更准确地描述弹头目标的散射特性。

此外,考虑到弹道导弹群目标中各子目标的微动特性差异,文献[24]建立了群目标的微动回波模型,并研究了基于微动特征的弹道导弹群目标分辨方法。

单基雷达通常只能获得目标微动在雷达视线(line of sight, LOS)方向上的投影分量,组网雷达或分布式多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)雷达可以形成多个观测视角,能够

克服单基雷达的姿态敏感性和遮挡效应带来的缺点,可以获得弹道目标更精确的三维微动特征。本课题组建立了多视角下弹道目标的三维微动回波模型^[25-27],并提出了“三维微多普勒(three-dimensional micro-Doppler)”效应的概念及理论模型,为弹道目标的三维微动特征提取与成像奠定了理论基础。

2 弹道目标微动特征提取与成像

2.1 基于单基雷达的微动特征提取与成像

传统单基窄带雷达的弹头目标回波分析大多基于 RCS 序列展开,考虑到弹头目标的周期性微动将对回波产生规律性的调制,因此目标的 RCS 序列也会呈现出周期变化的特性。在窄带雷达条件下,通过对目标的 RCS 序列进行周期估计,也可以实现弹道目标微动周期的提取^[28-30]。估计 RCS 序列周期的主要方法包括:一是基于回波频谱估计 RCS 序列的周期^[29],该方法需要较长的观测数据才能达到较高的精度,且由于 RCS 一般为非平稳信号,估计误差较大;二是基于自相关算法^[30]、幅度差算法^[31]以及二者的结合^[32]等方法,本质上都是通过 RCS 序列的相关性来估计周期,需要至少 2 个周期以上的观测时间才能达到要求,但容易出现倍频和分频误差。

其次,通过时频变换得到目标时频像进而采用图像处理的方法进行微动参数估计,也是单基窄带雷达弹道目标微动特征提取常用的方法。文献[33]通过对目标回波进行延迟共轭相乘处理,估计出目标的平移加速度,并提出 m-D 分解补偿提取 m-D 特征的方法,实现了高精度的 m-D 特征提取。文献[34]在建立锥形弹体目标章动模型的基础上,采用平滑伪 Wigner-Ville 分布(smoothed PWVD, SPWVD)对微多普勒信号进行分析,提取出锥体目标的章动周期。文献[35]采用 SPWVD 分析微多普勒的时频特性,并利用 Hough 变换同时提取了多个正弦调频信号的微多普勒特征参数。文献[36]利用时变自回归(time-varying auto regressive model, TVAR)模型估计出弹头目标散射中心的瞬时频率,在此基础上进行散射点关联和判别,并根据锥顶和锥底散射中心瞬时频率的变化差异,结合弹道估计得到目标几何尺寸及微动参数。另外,文献[37~38]针对复杂观测环境下窄带雷达微动目标回波不完整、相位污染导致的时频表征散焦问题,基于微动信号在时频域的稀疏性,提出稀疏自适应交替迭代的微动信号分离与重构方法,该方法也能用于弹道目标的微动特征提取。

单基宽带雷达可以获取目标的高分辨一维距离像(high resolution range profile, HRRP),而 HRRP 序列不仅与目标结构参数之间有直接的对应关系^[39],而且其序列中包含着丰富的目标运动信息。弹道目标微动对 HRRP 的调制影响主要表现在目标散射中心的分布和强度在 HRRP 序列上的周期性变化。因此,通过分析目标 HRRP 序列中的调制特征,可实现对弹道目标运动参数和结构参数的估计。文献[40]利用相邻 HRRP 之间的差分值形成一维差分序列,进而提取出弹道目标的进动频率。文献[41]通过正弦曲线拟合的方法从 HRRP 序列中提取出目标散射中心的微动和结构参数。文献[42]通过分析一维距离像上散射中心的位置变化特点,基于散射点回波的时频分布提取出锥柱弹头的进动频率。但基于 HRRP 序列的弹道目标微动特征提取也存在一定的局限性,由于 HRRP 的姿态敏感性,加之遮挡效应的影响,导致估计的目标微动参数往往不够稳健^[43]。

弹道目标的微动同样能引起目标相对于雷达的转角变化,有利于逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)成像。虽然目标微动产生的微多普勒被认为是一种干扰信号,容易导致 ISAR 图像散焦,但实际上弹头目标微动产生的微多普勒和各散射点在弹头上的分布有关,可以通过微多普勒的差异反演各散射点的方位向分布,从而实现微动目标成像^[44-45]。文献[46]利用旋转对称弹头微动引起的目标相对雷达视线角的快速变化,提出基于匹配追踪(matching pursuit, MP)稀疏分解的微动目标 ISAR 成像算法,克服了多分量信号交叉项的干扰,同时保持了较高的成像精度和稳定性。文献[47]建立了弹道目标运动模型和 ISAR 成像模型,在此基础上分析了微动对 ISAR 成像的影响,提出基于广义 Radon 变换(general Radon transform)和 Clean 技术的时频参数估计方法,实现了对中段目标近似匀加速转动时的 ISAR 成像。

此外,基于单基雷达还能够实现目标的三维成像,主要是通过获取雷达目标回波微多普勒参数来反演各微动散射点的三维结构和运动特征,西安电子科技大学白雪茹教授团队在该研究方向做出了大量有价值的研究工作^[48-52],获得了旋转对称目标、进动锥体目标等弹道目标的高分辨三维像。

2.2 基于双基雷达的微动特征提取与成像

双基雷达可以克服单基雷达对雷达视线的依赖性,能够获得较为丰富的微多普勒特征,且抗干扰能力更优^[53]。但双基雷达体制下目标散射特性的参数维度更高,高阶散射现象更加明显,处理难度也更大。

国防科技大学艾小锋教授团队在双基雷达微动特征提取与成像方面做了大量有价值的研究工作^[54-59]。其中,文献[54]建立了圆锥弹头进动的双基微动回波模型,并确定了 3 个典型散射中心,分别是锥顶及双基地角平分线在锥底平面上的投影与底面边缘的 2 个交点,实现了圆锥弹头进动和结构参数的估计。文献[55]针对时频分布-Hough 变换的缺点,提出基于粒子滤波的检测前跟踪(particle filter based track-before-detect, PF-TBD)算法,从弹头时频图中提取了所有散射中心的微多普勒曲线,实现了双基雷达下进动钝头双锥弹头的微多普勒特征提取;文献[56]进一步建立了可以描述 3 类散射中心微多普勒特征的统一参数化模型,提出可以区分局部型和滑动型散射中心的滑动系数,用于散射中心的类型判别,进而完成微动特征提取,图 2 为锥体目标在不同双基地角下的时频图。

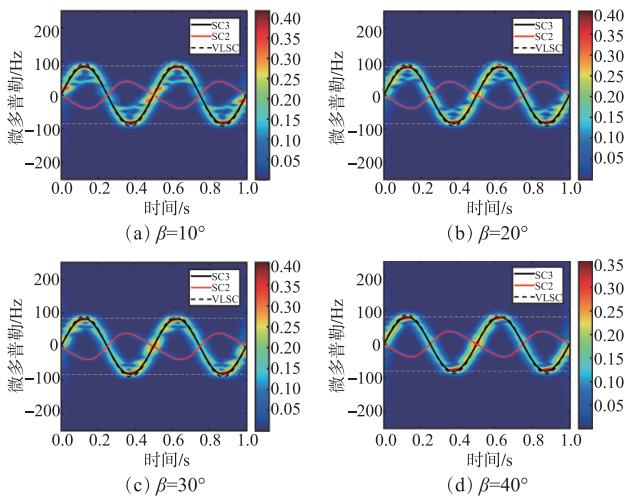


图 2 双基地角 β 变化时的时频图^[56]

进一步,文献[57]研究了双基雷达旋转对称弹头目标的散射特性,获得目标一维距离像并准确提取出目标长度信息。文献[58]提出了基于遗传算法-通用参数化时频变换(genetic algorithm-general parameterized time-frequency transform, GA-GPTF)的微多普勒曲线提取和参数估计方法。文献[60]分析了双基和单基条件下弹道目标的 HRRP 差异,利用双基 HRRP 序列提取出目标长度。仿真结果表明,相比利用单基 HRRP 提取的目标长度,利用双基 HRRP 提取的目标长度更加准确。马来西亚玛拉工艺大学的 Othman 等人利用自旋和进动理论定义的运动模型对双基雷达回波信号进行了分析,并通过时频分析对运动参数进行估计^[61]。

在双基弹道目标微动成像研究中,文献[62]建立了窄带 T/R-R 双基 ISAR 成像模型,在预判最佳成像时间的基础上,获得了自旋弹道目标的双基 ISAR 像。文献[63]进一步提出基于 T/R-R 双基

雷达的一维距离像序列和扩展 Hough 变换的进动参数联合估计方法,实现了目标进动角、雷达视线角及目标长度等参数的准确估计,并得到进动弹道目标的双基 ISAR 像。

2.3 基于多基/多天线雷达的三维微动特征提取与成像

基于多基/多天线雷达的多视角特性,可以形成多视角资源互补,从而获得目标更为精细的三维微动特征,其产生的“三维微多普勒”效应^[25-27],为弹道目标的分类识别提供了更加丰富的特征信息。

文献[64]建立了基于分布式组网雷达的有翼弹头目标三维微动回波模型,提取了目标的旋转周期、进动周期、进动角和锥底半径等进动和结构特征。文献[65~67]基于组网雷达建立了弹道目标的三维微动回波模型,实现了弹道目标三维进动参数的提取。韩国浦项科技大学的 In-OhChoi 等人利用窄带“一发三收”雷达网络实现了锥形弹头的高分辨率距离像重构,并提取出锥形弹头的章动频率等运动参数和锥体高度、底面直径等结构参数^[68]。

基于多天线干涉处理技术也能够实现目标的三维微动特征重构,本质上是通过多通道干涉处理获得目标微动散射中心位置随时间的变化规律。本课题组率先研究了基于多天线干涉的微动目标三维成像与特征提取方法,准确提取了弹道目标的三维微动参数和结构参数^[69-72]。相较于二维像,微动目标的三维像能够反映目标更加准确完整的运动或空间结构信息。文献[71]将多天线干涉处理的思想引入到宽带雷达弹道目标三维成像与三维微动特征提取研究中,重构出散射点在各时刻的瞬时三维坐标,并反演出目标的进动周期、进动角等微动特征参数以及目标长度与底面半径等结构参数。文献[72]提出一种基于线性调频步进信号的空间旋转目标干涉三维成像方法,在 L 型三天线配置下得到三天线的 HRRP 序列,并通过干涉处理重构出目标的三维坐标,反演出目标的瞬时三维像。见图 3~4。

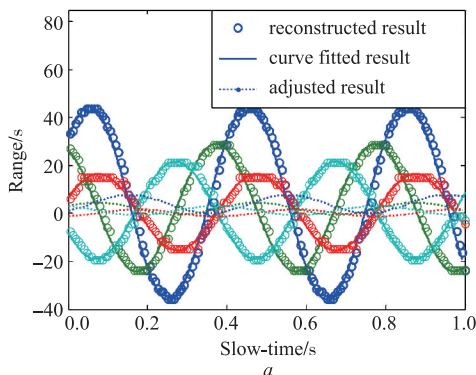


图 3 重构出的目标散射点三维坐标^[72]

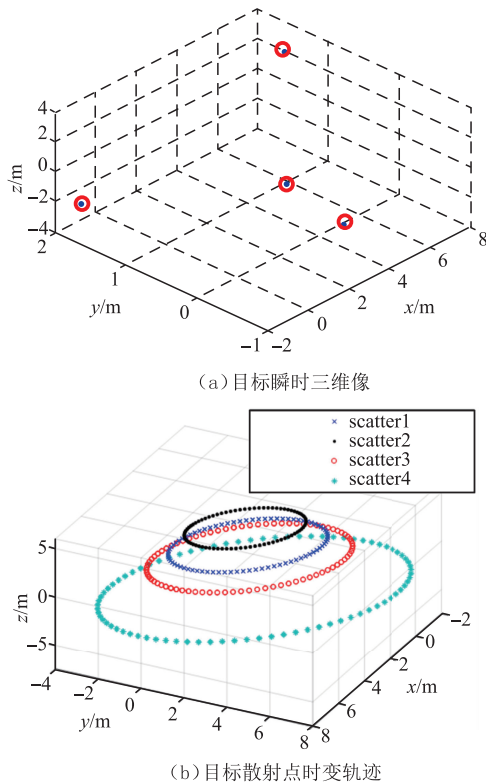


图 4 重构出的目标三维像及散射点时变轨迹^[72]

文献[73]通过分离不同散射中心的微多普勒信号,利用非线性最小二乘拟合得到散射中心对应的幅度和相位信息,并通过散射点配准与幅度信息估计,反演出微动散射点的微动参数及瞬时空间位置,实现了弹道目标的三维成像。

3 弹道目标分类与识别

3.1 基于人工特征的弹道目标分类与识别

早期的弹道目标分类识别方法需要进行人工特征提取,主要是通过 RCS 序列^[74-76]、HRRP 序列^[77-78]和时频分布^[79-81]等进行目标特征提取,提取的主要是目标回波数据或变换域数据的浅层特征,且构造人工特征往往需要一定的先验信息,需要花费大量的时间,抗噪声性能不佳。在特征提取的基础上,利用支持向量机(support vector machine, SVM)、K 最近邻(K-nearest neighbor, KNN)分类器等浅层的机器学习算法实现弹道目标的识别,但这类传统分类方法往往对特征依赖性强,存在鲁棒性不强和泛化能力差的问题。

文献[74]对目标 RCS 的幅度信息进行多特征量提取和模糊综合判决,并结合极化分集技术,实现了对两种导弹目标的分类,平均识别率达 91.7%。文献[75]将梅林(Mellin)变换应用于 RCS 序列,以反映目标的散射机理和运动特性,并通过顺序计算 RCS 时差序列的 Mellin 变换的均值和方差,实现了

弹道目标的分类。文献[76]提出微进动和微 RCS 的概念,并从进动锥体目标微 RCS 序列中估计出目标的进动参数和惯量比特征,据此完成弹头和诱饵的分类。文献[77]在分析不同弹道目标距离像峰值特征差异的基础上,利用弹头目标距离像的双峰特征提取,提取出距离像的质心分布和方差作为特征,从诱饵中识别出弹头。文献[78]研究了弹道目标 HRRP 序列的进动特性,通过提取目标散射点在雷达径向上的进动特征进行分类识别,在信噪比为 5 dB 条件下,对弹头的识别率达到 72%。

文献[79]从目标回波时频分布提取出时频图的平均熵值、频谱熵等特征,使用 SVM 分类器实现了锥体目标自旋、进动和章动 3 种微动的分类识别,当信噪比为 3 dB 时平均识别率为 63.2%。文献[80]分析了弹道目标进动、摆动及自旋的微多普勒特征差异,并采用特征值分解提取特征谱作为识别特征,使用 SVM 和 KNN 进行分类识别,在 10 dB 信噪比条件下两类分类器的识别率均高于 95%,−5 dB 时识别率仍在 80%以上。文献[81]提取回波信号的微多普勒谱熵与波形标准差作为识别特征,使用 SVM 和 KNN 分类器进行分类识别,在信噪比为 5 dB 条件下两类分类器的识别率均高于 97%,并分析了微动参数对识别性能的影响。

文献[82~87]结合弹道目标雷达回波的节奏速度谱图(cadence velocity diagram, CVD),在图像域采用伪 Zernike 矩^[82]、2 维 Gabor 滤波器^[83]、CVD 的平均和归一化^[84](averaging and normalizing the CVD, ACVD)等方法进行目标特征提取,进一步使用 KNN 分类器进行分类识别。其中,文献[84]利用 2 个大类和 5 个子类弹道目标的模拟数据和真实数据,对上述 3 种方法提取到的特征使用 KNN 分类器进行分类识别,在不同的信噪比、观测时间和特征维数条件下取得了较好的分类效果。文献[85]利用 Krawtchouk 矩从 2 个大类和 5 个子类的弹道目标 CVD 中进行特征提取,使用 KNN 分类器进行分类识别,当信噪比大于 0 dB 时识别率均在 90%以上,且由于 Krawtchouk 矩不依赖于特征维数,其运行时间相比文献[83]减少了 2~4 个量级。图 5 为算法的流程图。

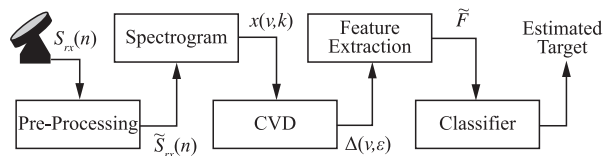


图 5 算法流程图^[85]

文献[86]针对锥体、圆柱和锥柱 3 种空间弹道目标,结合进动和摆动 2 种微动形式,使用 KNN 分

类器对提取到的特征进行分类与识别,在不同的旋转速率且信噪比大于−5 dB 时,不同微动的识别准确率和目标分类的准确率在 93%到 95%之间,形状识别的准确率达到 98%以上。文献[87]基于二元散射系数(binary scattering coefficient, BSC)模型、水平极化模型和垂直极化模型,使用 KNN 分类器对弹道目标进行分类识别,实验结果表明:在较低信噪比和较高旋转速率时,在形状识别能力和目标分类能力上,垂直极化模型比水平极化模型性能更优。

3.2 基于深度学习的弹道目标分类与识别

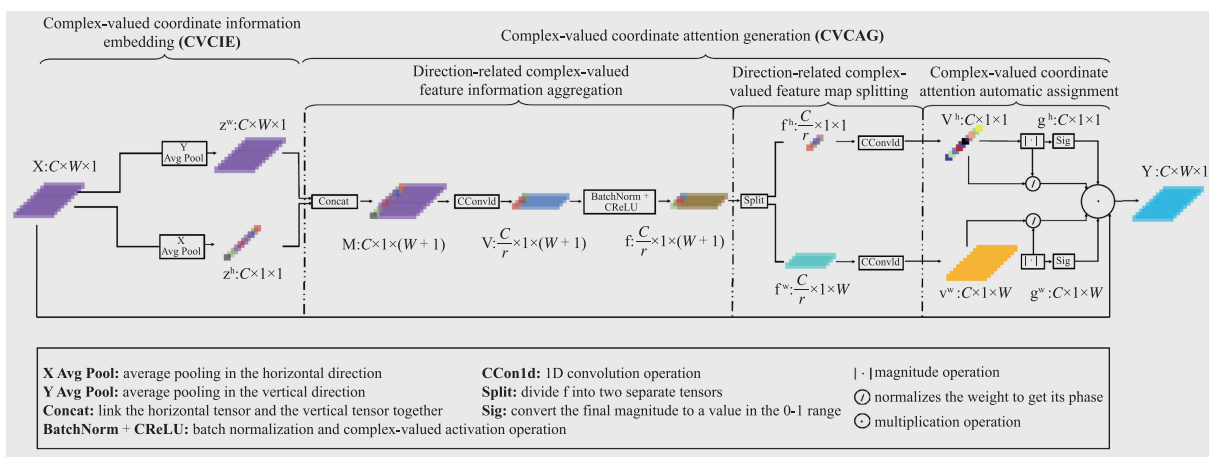
近年来,深度学习作为一种智能分类识别算法被广泛应用于面部表情识别、图像识别、飞机目标识别等领域,也成为弹道目标分类识别的研究热点之一^[88-94]。传统的目标识别包括特征提取与选择、分类器设计、训练与测试、分类识别等步骤,基于深度学习的目标分类识别可以整合以上步骤,通过具有强大特征表达能力的深度网络提取高维特征,可以避免人工提取特征和人工设计分类器的局限性;利用深度网络的泛化学习能力,可以实现高精度的弹道目标微动分类与识别,大大减少了工作量和人工干预程度,且抗噪性强。

在信噪比为 0 dB 时,文献[79]提取时频图的平均熵值、频谱熵等特征,使用 SVM 进行分类的准确率低于 60%,使用文献[90]这种深度学习方法的目標分类准确率达 96%以上,而使用文献[92]所提深度学习网络平均识别率高达 99.9%;进一步,当信噪比下降到−5 dB 时,传统分类方法^[79]的准确率不足 50%,而深度学习模型^[90]的目标分类准确率仍保持在 90%左右。与传统分类方法相比,基于深度学习的分类识别方法抗噪性能更好,分类准确率更高。

在弹道目标分类识别方面,本课题组提出基于复数坐标注意力网络(complex-valued coordinate attention networks, CV-CANets)的端到端识别方法^[88],避免了回波信号预处理和相位信息丢失,在观测时长不超过半个周期的条件下,实现了微动形式相同、微动参数有微小差异的相似空间锥体目标的高精度识别。表 1 为文献[88]中不同网络的识别性能结果对比,可见所提的 CV-CANets 识别方法的平均识别率均在 97%以上,高于其他网络识别结果,图 6 为设计的 CV-CA 模块结构示意图。

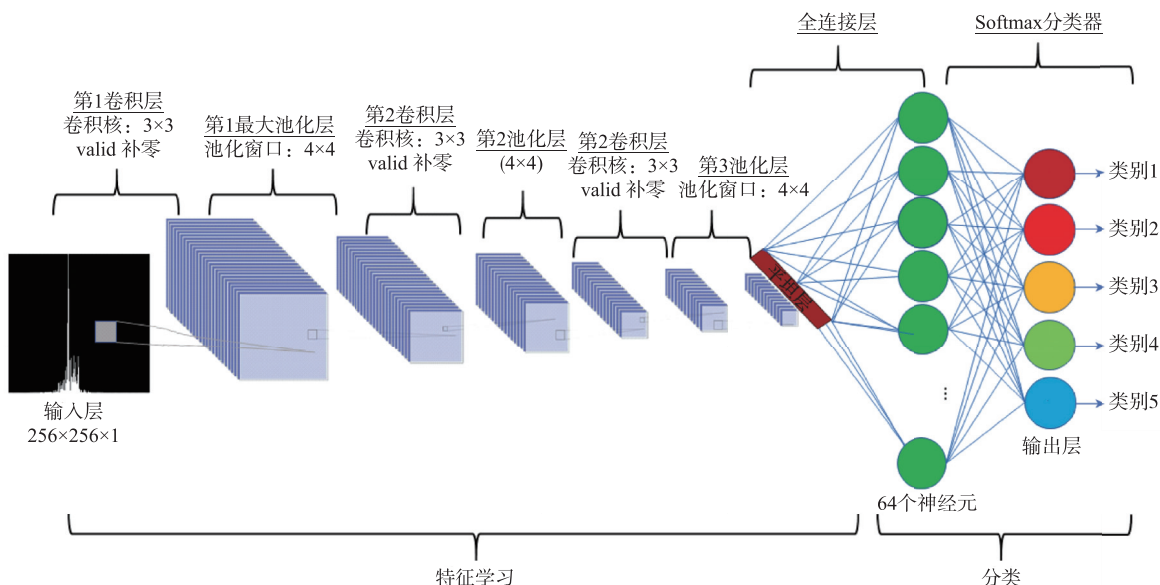
表 1 基于复数坐标注意力网络的锥体目标分类结果^[88]

Method	P_{acc}	P_{pre}	F_1	P_{fa}
CV-FCNN _{1×1}	0.950 0	0.956 2	0.944 1	0.950 1
CV-DVNN	0.967 5	0.969 9	0.965 6	0.967 8
CV-DFCN	0.971 5	0.973 1	0.970 3	0.971 7
CV-CANet	0.980 7	0.983 8	0.977 9	0.980 8

图 6 CV-CA 模块结构示意图^[88]

文献[89]提出基于深度卷积神经网络(deep convolution neural network, DCNN)的弹道目标 HRRP 图像识别方法。该方法将高分辨一维距离像转化为 0-1 二值图像中的点、线和 2 种面图像特征,利用 DCNN 的视知觉机制逐层提取到目标局部

特征中的丰富结构信息,并结合 Dropout 和 L2 正则化双重机制缓解过拟合,使用 AdaBound 算法优化训练,最后运用 Softmax 实现了对 5 种弹道目标的分类,识别准确率达 96% 以上,其设计的 IMG-DCNN 网络结构如图 7 所示。

图 7 IMG-DCNN 的网络结构^[89]

文献[90]根据自旋、进动和章动的雷达回波时频图,将 AlexNet 和 GoogleNet 用于弹道目标微动分类。文献[91]使用 AlexNet 和 SqueezeNet 对目标自旋、进动和章动的时频图进行训练和测试,实现了 3 种微动的识别,平均分类准确率达 96% 以上。文献[92]将残差网络、Inception 网络和双向长短期记忆网络(bidirectional long short-term memory, BiLSTM)相结合,通过对时频图分析处理完成对弹道目标的分类。与更深层的 ResNet-18 和 GoogLeNet 相比,分类精度分别提高了 5% 和 4%,且速度明显更快,适用性更好。

为了克服 CNN 的超参数和结构选择需要足够的人力、经验和大量计算时间,且很难得到最优参数

的缺点,文献[93]利用自旋、进动和章动时频图构建数据集训练和测试网络,并提出用贝叶斯优化算法来自动获取 CNN 的超参数和最优结构的方法。通过对卷积层数、初始学习率、随机梯度下降的动量以及正则化强度的数值等变量进行迭代优化,获得了比无贝叶斯优化的 CNN 更高的识别准确率;且在信噪比为 -15 dB 的情况下,综合识别率仍比基于迁移学习的 AlexNet、GoogLeNet、SqueezeNet 等网络分别高出 9.8%、7.3% 和 5.6%。

文献[94]针对弹头进动、章动和诱饵旋转、振动等微动形式,提出一维并行结构(one-dimensional parallel structure)和长短期记忆(long short-term memory, LSTM)网络组成的深度学习模型,把不

同深度卷积层提取到的特征结合到一起,通过对不同微动的时频图进行训练,以提高对弹道目标微动特征的提取和识别能力。在相同信噪比条件下,分类准确率明显高于 AlexNet、GoogLeNet 和 VGG 等,且具有更好的抗噪性能;当信噪比低于 0 dB 时,传统分类方法^[95]的识别准确率低于 60%,该模型的分类准确率仍然在 95%左右。

可以看到,相比于传统分类算法,基于深度神经网络在弹道导弹目标分类识别中具有明显的性能优势,分类识别率显著提高。随着研究的深入,后续还会有性能更优的深度网络逐渐面世。但同时可以发现,深度神经网络的分类识别能力对弹道目标的数据量、硬件能力具有较高的依赖性,且提取到的特征,物理可解释性较差。

4 总结与展望

近年来,随着雷达新体制新技术的不断发展和研究的不断深入,涌现出许多关于弹道目标微动特征提取与分类识别的新技术和新方法,并向智能化、体系化逐步发展。今后,弹道导弹目标雷达微动特征提取与识别仍将是雷达目标识别领域的重要研究热点之一,同时也是一个复杂的系统工程,需要电磁学、控制学、动力学、数学、信号处理和模式识别等多学科多领域的交叉融合,还有许多亟待研究解决的问题。通过对现有研究的分析总结,可以预计未来在以下几个方面需要进一步研究突破。

4.1 弹道目标三维微动特征重构

弹道导弹目标在飞行过程中要经历调姿、加速甚至变轨等机动动作,目标运动姿态变化极其复杂多样,在不同的雷达视角下,其微多普勒特征将呈现出明显的差异性,同时还受到复杂电磁衍射绕射、遮挡效应、有源/无源干扰等的影响,给弹道目标微动特征的准确提取与精准识别带来极大的挑战。近年来,国内外许多研究机构和学者开展了基于多基/多天线雷达的弹道目标三维微动特征提取与成像研究,提供了更高的空间自由度和目标更加丰富的信息,为弹道目标的准确识别开辟了新思路,但距离实际应用还存在一定差距,且多基分布式组网雷达的同步及关联、强干扰背景下的回波缺损、目标的散射各向异性等问题,都会影响特征提取的精度和识别的准确性,这都是弹道目标三维微动特征重构值得进一步研究解决的问题。

4.2 弹道群目标的微动特征高效提取

实际中,弹道导弹突防时通常会释放轻重诱饵和干扰装置,同时还伴随有大量碎片、箔条,形成弹

道群目标,雷达面对这样的密集群目标,需要对各个目标执行检测、跟踪、特征提取与识别等多种任务,此时雷达分配给单个目标的观测资源非常有限,加之每个目标的威胁程度也各不相同,实际中弹道群目标的回波处理将异常复杂,微动特征难以实时准确提取。因此,需要研究多目标条件下的雷达资源优化分配和微动特征高效提取问题。随着认知雷达技术的发展,有望根据不同任务类型和目标特征信息、威胁等级等多任务进行认知协同处理,进一步结合目标特征在线感知情况、环境信息及微动特征提取、分类识别的需求等进行认知资源调度与分配,在现有博弈论、启发式算法等方法的基础上不断创新,实现弹道群目标微动特征的高效提取。

4.3 弹道目标智能分类识别

近年来,以深度学习、强化学习等为代表的人工智能算法在雷达图像处理、特征提取、目标识别等领域得到广泛应用,并取得了显著的成果,但该类算法对数据的数量、质量都有较高的要求。弹道目标分类识别是成功实施目标拦截的关键,对于实时性和准确性要求极高。现有的基于深度学习的弹道目标特征提取和分类识别,尽管在离线状态下可以实时、高精度的完成目标分类识别,但大多基于仿真或暗室数据,真实的目标数据较为缺乏,且实际战场环境下的复杂数据更加难以获取。因此,基于深度学习理论框架,如何在小样本、零样本或开集等条件下完成弹道目标的高精度实时分类识别,并对未知目标具有一定的泛化性、迁移性,同时网络具有一定的物理可解释性,仍是制约弹道目标分类识别的技术障碍,亟待研究突破。

4.4 新体制雷达弹道目标微动特征提取与成像

随着新体制雷达技术的飞速发展,如微波光子雷达、太赫兹雷达、涡旋电磁波雷达等,有望在弹道导弹目标的微动特征提取与成像方面取得新的突破。近年来兴起的微波光子雷达、太赫兹雷达具有高载频、大带宽的特点,对微动十分敏感且距离分辨力很高,有利于弹道目标快速成像和精细微动特征获取,从而可对目标进行更精确的识别。但高载频、低重频会带来微多普勒模糊问题,平台的微小抖动、振动等会严重影响目标的微动特征提取与成像,必须考虑平台、算法的一体化设计与研究。进一步,考虑到实际中弹头目标在三维空间的微动十分复杂,而传统雷达只能获取目标在雷达视线方向的微动分量(称为线多普勒),对于垂直于雷达视线方向的微动分量(称为角多普勒)难以有效获取,而涡旋电磁波雷达有望同时获取弹头微动的线多普勒和角多普勒分量,使弹头目标微动特征的精确重构成为可能,

这方面的研究尚处于起步阶段,还有大量理论和工程问题需要进一步研究。

参考文献

- [1] 刘永祥,黎湘,庄钊文. 空间目标进动特性及在雷达识别中的应用[J]. 自然科学进展, 2004, 14(11): 1329-1332.
- [2] 金林. 弹道导弹目标识别技术[J]. 现代雷达, 2008, 30(2): 1-5.
- [3] 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.
- [4] CHEN V C. Analysis of Radar Micro-Doppler Signature with Time-Frequency Transform[C]// Proceedings of the IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Processing. Pocono Manor, PA: IEEE, 2000: 463-466.
- [5] CHEN V C. The Micro-Doppler Effect in Radar[M]. Boston, London: Artech House, 2011: 35-78.
- [6] CHEN V C, MICELI W J, and HIMED B. Micro-Doppler Analysis in ISAR-Review and Perspectives [C]// 2009 International Radar Conference "Surveillance for a Safer World" (RADAR 2009). Bordeaux, France: IEEE, 2009: 1-6.
- [7] 冯存前,贺思三,童宁宁,等. 弹道目标微多普勒效应分析与特征提取[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018: 1-28.
- [8] ZHANG Q, LUO Y, CHEN Y A. Micro-Doppler Characteristics of Radar Targets[M]. Amsterdam: Elsevier, 2017: 1-17.
- [9] 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.
- [10] SCHULTZ K, DAVIDSON S, STEIN A, et al. Range Doppler Laser Radar for Midcourse Discrimination: the Firefly Experiments[C]// Annual Interceptor Technology Conference. Albuquerque, NM: AIAA, 1993: 1-12.
- [11] HOLZRICHTER J F. S-Band Radar Micro-Doppler Signatures for BMD Discrimination[R]. MDA-04-137, Missile Defense Agency Small Business Innovation Research Program, 2004.
- [12] Ballistic Missile Defense Organization. 1994 Report to the Congress on Ballistic Missile Defense[R]. Washington, D. C., 1994.
- [13] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 3.
- [14] 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.
- [15] THAYAPARAN T, STANKOVIĆ L, 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.
- [16] 高红卫,谢良贵,文树梁,等. 弹道导弹目标微动特性的微多普勒分析与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(4): 954-957,961.
- [17] 李开明. 微动目标微多普勒信息提取及特征识别[D]. 西安: 空军工程大学, 2009.
- [18] 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.
- [19] 金光虎,高勋章,黎湘,等. 中段目标微运动建模方法与宽带雷达回波仿真[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(4): 867-871.
- [20] 喻荣梅,张仕元,肖健华. 弹道目标移动散射点模型的微多普勒特征研究[J]. 测控技术, 2014, 33(3): 154-156.
- [21] 姚辉伟,魏玺章,徐少坤,等. 弹道中段进动目标非理想散射中心微动特性研究[J]. 电子学报, 2012, 40(9): 1844-1851.
- [22] GERRY M J, POTTER L C, GUPTA I J, et al. A Parametric Model for Synthetic Aperture Radar Measurements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(7): 1179-1188.
- [23] 冯艾茜,郭琨毅,盛新庆. 无翼平头弹头的属性散射中心模型改进与参数估计[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(9): 961-967.
- [24] 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.
- [25] 罗迎,张群,封同安,等. OFD-LFM MIMO 雷达中旋转目标微多普勒效应分析及三维微动特征提取[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(1): 8-13.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 张仕元. 基于三角函数拟合的 RCS 序列进动周期估计[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(6): 1389-1393.
- [29] LIU L H, WANG Z, HU W D. Procession Period Extraction of Ballistic Missile Based on Radar Measurement[C]// 2006 CIE International Conference on Radar. Shanghai, China: IEEE, 2006: 1-4.
- [30] 冯德军. 弹道中段目标雷达识别与评估研究[D]. 长

- 沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [31] ROSS M, SHAFER H. Average Magnitude Difference Function Pitch Extractor[J]. IEEE Transactions on Acoustic, Speech and Signal Processing, 1974, 22(5): 355-362.
 - [32] 冯德军, 丹梅, 马梁. 一种鲁棒的弹道目标 RCS 周期估计方法[J]. 航天电子对抗, 2008, 24(2): 5-7, 50.
 - [33] GU F F, FU M H, LIANG B S, et al. Translational Motion Compensation and Micro-Doppler Feature Extraction of Space Spinning Targets[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(10): 1550-1554.
 - [34] YAO H Y, LI X X, SUN W F, et al. Micro-Doppler Analysis of Nutation Target in Ballistic Midcourse[C]// IET International Radar Conference 2013. Xi'an, China: IET, 2013: 1-5.
 - [35] LIU Y X, LI X, ZHUANG Z W. Estimation of Micro-Motion Parameters Based on Micro-Doppler[J]. IET Signal Processing, 2010, 4(3): 213-217.
 - [36] 韩勋, 杜兰, 刘宏伟. 基于窄带微多普勒调制的锥体目标参数估计[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4): 961-968.
 - [37] WANG H, KANG L, LI K M, et al. Decomposition for Multi-Component Micro-Doppler Signal with Incomplete Data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 1-5.
 - [38] WANG H, LI K M, ZHANG Y P, et al. Separation of Phase-Corrupted Multicomponent Nonlinear Chirp Signal[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 1-5.
 - [39] DU L, LIU H W, and BAO Z. Radar HRRP Statistical Recognition: Parametric Model and Model Selection[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(5): 1931-1944.
 - [40] 周代英, 张瑛, 冯健. 利用一维像序列时域差分估计目标进动频率[J]. 航空学报, 2018, 39(S1): 722183.
 - [41] 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.
 - [42] 韦楠楠, 张兴敢. 利用 HRRP 序列估计弹道中段目标进动频率[J]. 信号处理, 2022, 38(4): 729-738.
 - [43] RIHACZEK A W, HERSHKOWITZ S J. Theory and Practice of Radar Target Identification[M]. Boston, London: Artech House, 2000.
 - [44] CHEN C C, ANDREWS H C. Target-Motion-Induced Radar Imaging[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1980, 16(1): 2-14.
 - [45] LI K M, LIANG X J, ZHANG Q, et al. Micro-Doppler Signature Extraction and ISAR Imaging for Target with Micromotion Dynamics[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(3): 411-415.
 - [46] 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(2): 2649-2654.
 - [47] ZOU F, FU Y W, 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.
 - [48] NING Y, ZHOU F, BAI X R, et al. A Method for 3-D ISAR Imaging of Space Debris[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(2): 864-876.
 - [49] ZHOU F, NING Y, BAI X R, et al. Nonparametric Bayesian 3-D ISAR Imaging of Space Debris[C]// IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia, Spain: IEEE, 2018: 4595-4598.
 - [50] BAI X R, ZHOU F, 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.
 - [51] BAI X R, 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.
 - [52] BAI X R, BAO Z. High-Resolution 3D Imaging of Precession Cone-Shaped Targets[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(8): 4209-4219.
 - [53] CHEN V C, ROSIERS A D, and LIPPS R. Bi-Static ISAR Range-Doppler Imaging and Resolution Analysis[C]// 2009 IEEE Radar Conference. Pasadena, CA: IEEE, 2009: 1-5.
 - [54] 邹小海, 艾小锋, 李永祯, 等. 进动圆锥弹头双基地微多普勒特性分析[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(3): 609-615.
 - [55] 邹小海, 艾小锋, 李永祯, 等. 基于 PF-TBD 的双基地微多普勒提取[J]. 信号处理, 2013, 29(3): 304-312.
 - [56] 徐志明, 艾小锋, 刘晓斌, 等. 基于散射中心滑动特性的双基地雷达锥体目标微动特征提取方法[J]. 电子学报, 2021, 49(3): 461-469.
 - [57] AI X F, ZOU X H, LI Y Z, et al. Bistatic Scattering Centers of Cone-Shaped Targets and Target Length Estimation[J]. Science China Information Sciences, 2012, 55(12): 2888-2898.
 - [58] AI X F, XU Z M, WU Q H, et al. Parametric Representation and Application of Micro-Doppler Characteristics for Cone-Shaped Space Targets[J]. IEEE

- Sensors Journal, 2019, 19(24): 11839-11849.
- [59] 徐志明, 艾小锋, 周柯宏, 等. 双基地雷达微动空间目标全极化回波仿真方法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(10): 2789-2796.
- [60] QU Q Y, GUO K Y, SHENG X Q. Length Estimation of Extended Targets Based on Bistatic High Resolution Range Profile[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2015, 24(3): 387-391.
- [61] OTHMAN K A, KAMAL P F S A, ABD RASHID N E, et al. Study of Micro-Doppler Effect on Target Spinning and Precession for Bistatic Radar[C]// 2018 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET). Serpong, Indonesia: IEEE, 2018: 1-4.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] 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.
- [65] 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, 2015, 42(2): 146-151.
- [66] 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.
- [67] 许丹, 田波, 李靖卿, 等. 混合体制雷达网弹道目标进动特征提取[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(5): 138-145.
- [68] CHOI I O, PARK S H, KANG K B, et al. Efficient Parameter Estimation for Cone-Shaped Target Based on Distributed Radar Networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(21): 9736-9747.
- [69] 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.
- [70] HU J, LUO Y, ZHANG Q, et al. Three-Dimensional Interferometric Imaging and Micromotion Feature Extraction of Spinning Space Debris in Low-Resolution Radar[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2018, 12(4): 046013.
- [71] 胡健, 罗迎, 张群, 等. 弹道目标宽带雷达干涉式三维成像与微动特征提取[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(8): 1865-1871.
- [72] XUN 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.
- [73] 冯存前, 陈蓉, 黄大荣, 等. 基于组网雷达的有翼弹道目标三维成像[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(3): 517-524.
- [74] 许小剑, 黄培康. 利用 RCS 幅度信息进行雷达目标识别[J]. 系统工程与电子技术, 1992, 31(6): 1-9.
- [75] XIANG X H, XU X J. Feature Extraction for Radar Target Recognition Using Time Sequences of Radar Cross Section Measurements[C]// 2013 6th International Congress on Image and Signal Processing (CISP). Hangzhou, China: IEEE, 2013: 1583-1587.
- [76] 陈行勇, 黎湘, 郭桂蓉. 微进动弹道导弹目标雷达特征提取[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(4): 643-646.
- [77] DAI J H, WANG J F. Recognition of Warheads Based on Features of Range Profiles in Ballistic Missile Defense[C]// 2016 CIE International Conference on Radar (RADAR). Guangzhou, China: IEEE, 2016: 1-4.
- [78] ZHOU D Y, YANG J H. Ballistic Target Recognition Based on Micro-motion Characteristics Using Sequential HRRPs[C]// 2013 IEEE 4th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication. Beijing, China: IEEE, 2013: 165-168.
- [79] 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.
- [80] 关永胜, 左群声, 刘宏伟, 等. 空间锥体目标微动特性分析与识别方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2011, 38(2): 105-111.
- [81] 关永胜, 左群声, 刘宏伟, 等. 基于微多普勒特征的空间锥体目标识别[J]. 电波科学学报, 2011, 26(2): 209-215+412.
- [82] PALLOTTA L, CLEMENTE C, MAIO A D, et al. Pseudo-Zernike Moments Based Radar Micro-Doppler Classification[C]// 2014 IEEE Radar Conference. Cincinnati, OH, USA: IEEE, 2014: 850-854.
- [83] PERSICO A R, CLEMENTE C, ILIOUDIS C, et al. Micro-Doppler Based Recognition of Ballistic Targets Using 2D Gabor Filters[C]// 2015 Sensor Signal Processing for Defense (SSPD). Edinburgh, UK: IEEE, 2015: 1-5.

- [84] PERSICO A R, CLEMENTE C, GAGLIONE D, et al. On Model, Algorithms and Experiment for Micro-Doppler Based Recognition of Ballistic Targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(3): 1088-1108.
- [85] PERSICO A R, CLEMENTE C, PALLOTTA L, et al. Micro-Doppler Classification of Ballistic Threats Using Krawtchouk Moments[C]// 2016 IEEE Radar Conference. Philadelphia, USA: IEEE, 2016: 1-6.
- [86] PERSICO A R, ILIOUDIS C, CLEMENTE C, et al. Novel Approach for Ballistic Targets Classification from HRRP Frame[C]// 2017 Sensor Signal Processing for Defense Conference (SSPD). London, UK: IEEE, 2017: 1-5.
- [87] PERSICO A R, ILIOUDIS C, CLEMENTE C, et al. Novel Classification Algorithm for Ballistic Target Based on HRRP Frame[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(6): 3168-3189.
- [88] ZHANG Y P, ZHANG Q, KANG L, et al. End-to-End Recognition of Similar Space Cone-Cylinder Targets Based on Complex-Valued Coordinate Attention Networks[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-14.
- [89] 向前, 王晓丹, 李睿, 等. 基于 DCNN 的弹道中段目标 HRRP 图像识别[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(11): 2426-2433.
- [90] 李江, 冯存前, 王义哲, 等. 基于深度卷积神经网络的弹道目标微动分类[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(4): 97-104.
- [91] WANG Y Z, FENG C Q, ZHANG Y S, et al. Classification of Space Targets with Micro-Motion Based on Deep CNN[C]// Proceedings of the 2019 IEEE 2nd International Conference on Electronic Information and Communication Technology. Piscataway: IEEE, 2019: 557-561.
- [92] 李江, 冯存前, 王义哲, 等. 一种用于锥体目标微动分类的深度学习模型[J]. 西安电子科技大学学报, 2020, 47(3): 105-112.
- [93] 李鹏, 冯存前, 许旭光, 等. 一种利用贝叶斯优化的弹道目标微动分类网络[J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48(5): 139-148.
- [94] HAN L X, FENG C Q. Micro-Doppler-Based Space Target Recognition with a One-Dimensional Parallel Network[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2020: 1-10.
- [95] WANG Y Z, FENG C Q, ZHANG Y S, et al. Space Precession Target Classification Based on Radar High-Resolution Range Profiles[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2019: 1-9.

(编辑:徐敏)