

项目名称：弹道目标特征提取与智能识别方法研究

提名者：中国人民解放军空军工程大学

提名意见：

弹道目标识别是弹道导弹防御体系的核心技术瓶颈。该项目围绕“弹道目标特征提取与智能识别方法研究”，在五项国家自然科学基金等项目持续资助下，历经二十余年攻关，在稀疏孔径平动补偿、空间多目标三维微动特征提取、小样本 HRRP 智能识别、证据理论不确定性度量及 SAR 图像可解释识别等方向取得系统性原创成果。

通过研究，提出稀疏孔径机动目标平动补偿的维度压缩优化方法，通过瞬时自相关变换将多维参数估计转化为一维优化问题，在随机稀疏、块稀疏及低信噪比条件下均能有效补偿平动；首次建立距离-频率-时间三维联合处理框架，提出 2D ARSLO 稀疏重构算法与三维分割维特比算法，在低信噪比下稳定提取各目标微动参数；提出深度可分离融合一维卷积与 SFCD 损失函数，参数量减少 56%，小样本条件下识别精度提升 5 个百分点以上；揭示非鲁棒特征与不可解释性的内在关联，提出“透明结构+对抗防御”的可解释识别框架；提出基于区间概率的 SU 不确定性度量，解决了经典度量反直觉的缺陷。

五篇代表作发表于 IEEE TAES、IEEE TGRS、ESWA、Applied Intelligence 等权威期刊，合计被引 258 次。其中证据理论不确定性度量工作获陕西省第十四届自然科学优秀论文三等奖，入选 ESI 高被引论文与热点论文；两部专著获国防科技图书出版基金资助。相关成果支撑完成人入选军队科技英才、中国科协青年人才托举工程（军事领域）、陕西省青年科技人才托举工程、陕西省青年科技新星及陕西省“千人计划”（青年项目），已完成陕西省科技成果登记四项。

该项目科学发现具有原创性，得到国内外学术界的广泛认可，研究成果达到国际先进水平，符合陕西省自然科学奖授奖条件。对照陕西省自然科学奖二等奖评定标准，提名该项目为陕西省自然科学奖二等奖。

项目简介

一、概述

弹道目标识别是弹道导弹防御体系的核心技术瓶颈，其本质是在空间目标群中准确区分真弹头与各类诱饵，直接决定拦截成败。中段飞行中，真弹头受扰动产生进动与章动，锥形重诱饵因缺乏姿态控制系统呈摇摆状态，二者微动特性的本质差异使微多普勒效应成为真假目标识别的有效途径。然而，弹道目标识别面临目标群回波混叠、稀疏孔径数据缺损、小样本条件下模型泛化不足等严峻挑战，传统方法难以兼顾特征可分性与识别稳健性。

项目团队围绕“弹道目标特征提取与智能识别方法研究”这一核心课题，在国家自然科学基金等项目持续资助下，历经十余年攻关，从物理层信号处理、特征层多维表征、决策层智能识别三个层面开展系统研究，形成了从原始回波到高置信度识别的完整技术链条。团队在弹道目标微多普勒效应分析、平动补偿、多分量微多普勒分离、微动特征提取、三维联合域表征、稀疏重构成像及智能识别等方向取得系统性创新成果，相关理论成果在 IEEE TAES、IEEE TGRS、ESWA、IEEE TGRSL、API 等权威期刊发表，并出版三部学术专著系统阐述该领域的研究体系。

二、研究背景与总体思路

弹道目标特征提取与智能识别面临三大基础性难题。其一，目标高速机动导致回波存在严重的距离弯曲和高阶相位，雷达散射截面起伏造成脉冲稀疏缺失，传统平动补偿方法在稀疏孔径下失效，严重制约后续特征提取精度。其二，群目标中各类目标微动形式各异（进动、章动、旋转等），回波在传统时频域和距离域严重叠加混叠，现有方法依赖时频分析等信号处理技术，在多目标、低信噪比条件下分离精度急剧下降。其三，深度学习方法虽在识别精度上取得突破，但标准卷积神经网络参数量大、小样本条件下易过拟合，且决策过程不透明、决策依据不可靠，难以满足实战需求。

针对上述难题，项目组确立了“底层信号处理保障数据质量→中层多维表征丰富特征信息→高层智能算法实现可靠识别→横向方法论提供全局评估与优化”的总体研究思路，形成了一套覆盖“数据—特征—决策—评估”全要素的完整技术体系。

三、主要研究成果

在稀疏孔径机动目标平动补偿方面，建立了平动三阶多项式与转动二阶多项式的联合运动模型，提出维度压缩优化方法。通过瞬时自相关变换将多维参数估计转化为一维优化问题，利用傅里叶变换矩阵与非均匀傅里叶变换矩阵构建维数压缩矩阵，以矩阵对比度为目标函数，采用 RMSprop-MGD 算法高效求解平动参数。该方法在随机稀疏、块稀疏及低信噪比条件下均能有效补偿平动，为后续

特征提取奠定了基础。

在空间多目标三维微动特征提取方面，项目建立了锥体空间多目标微动模型，首次提出距离-频率-时间三维联合处理框架。提出二维自适应正则化平滑 L0 范数稀疏重构算法，实现高分辨 ISAR 图像序列的直接二维重构；利用 CLEAN 算法提取强散射点坐标构建三维雷达数据立方体；设计三维分割维特比算法，通过距离和频率双重惩罚函数实现散射点轨迹关联，在低信噪比下稳定提取各目标微动参数，为多目标识别提供了全新的三维域解决范式。

在小样本条件下弹道目标 HRRP 智能识别方面，项目从网络轻量化和损失函数设计两方面协同突破。提出深度可分离融合一维卷积，以“逐点卷积-深度卷积-逐点卷积”三级结构替代标准卷积，参数量降至标准卷积的约 $3/H$ 倍；提出样本级拟合与类级可分性损失，将交叉熵损失与度量学习约束统一于惩罚函数框架，通过选取最难正/负样本参与训练增强特征空间可分性；提出参数量偏移-拟合性能坐标系，揭示了模型参数量与识别性能的系统性关系，为小样本条件下的网络设计提供了理论指导。

在 SAR 图像可解释识别方面，项目提出可解释模型应同时满足“决策过程透明”与“决策依据合理”两大条件，以 BagNet 的局部感受野结构保证决策过程可追溯，以对抗防御训练约束模型学习鲁棒特征，使决策依据从背景区域向目标本体集中，在干净数据和多种对抗攻击下均保持高精度。

在证据理论不确定性度量方面，项目证明了信度区间构成区间概率分布，提出基于区间概率的 SU 度量，由区间中值香农熵和区间半宽两项构成，直接在证据理论框架内定义，避免向概率框架转换带来的信息损失，在多传感器目标识别融合中实现了传感器可分性的有效排序。

客观评价

该项目研究成果在弹道目标特征提取与智能识别领域形成了系统性理论突破，五篇代表性论文发表于本领域权威期刊，得到国内外学术界的广泛关注与正面评价。以下从学术影响力、代表性论文评价、专著与人才培养、整体学术价值四个方面进行客观评述。

（一）学术影响力总体概况

五篇代表作在 Semantic Scholar 学术数据库中合计被引 258 次（截至 2026 年 8 月 16 日），其中包含直接引用语境的引文达 101 篇，体现了研究成果的广泛学术辐射力。从被引分布看，证据理论不确定性度量论文（代表作 1）被引 159 次，占全部被引的 61.6%，是该成果中学术影响力最为突出的工作；HRRP 智能识别论文（代表作 4）被引 59 次，位列其次；三维微动特征提取论文（代表作 3）被引 18 次，平动补偿论文（代表作 2）被引 12 次，SAR 可解释识别论文（代表

作 5) 被引 10 次。上述被引数据表明, 五项成果在各自细分方向均获得了稳定的学术关注。

(二) 代表性论文的同行评价

(1) 证据理论不确定性度量 (代表作 1)

该论文发表于《Applied Intelligence》, 被国内外证据理论领域大量文献作为标准不确定性度量引用、比较与改进。有引文将其列为“应用最广泛的度量之一”, 与 JS 熵、Deng 熵并列。多篇 IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems 论文将其作为典型不确定性度量进行系统介绍与理论分析。研究者在提出新度量时, 常以该 SU 度量为对比基准验证新方法有效性, 引文中明确评价“其结果比其他方法更直观”。该论文获陕西省第十四届自然科学优秀论文三等奖, 并入选 ESI 高被引论文与 ESI 热点论文。

(2) 稀疏孔径平动补偿 (代表作 2)

该论文发表于 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 被国际雷达信号处理领域视为参数化平动补偿的代表性方法。后续研究者将其方法作为对比算法, 系统分析了该方法的优势与适用边界, 指出其“在稀疏孔径条件下需要低采样频率的参数化平动补偿算法”具有独特价值。该工作被纳入机动目标 ISAR 成像的经典方法体系, 在多篇后续研究中作为方法基础被引用。

(3) 空间多目标三维微动特征提取 (代表作 3)

该论文发表于 Signal Processing, 所提出的三维联合域处理框架被后续研究直接沿用。同行引文明确指出, 该方法“基于距离-频率-时间三维域实现了多个空间目标的微动特征提取”, 并将所提出的 2D AReSLO 稀疏重构算法作为后续工作的算法基础。多篇后续研究将其列为多目标微动特征提取的典型方法进行引用与比较。

(4) 小样本 HRRP 智能识别 (代表作 4)

该论文发表于 Expert Systems With Applications, 所提出的 DSF 1D-Conv 轻量化结构、SFCD 损失函数与 PQS-FP 坐标系被多个跨领域研究团队采纳。引文评价指出, DSFCNN“利用深度卷积和逐点卷积, 与标准 CNN 相比降低了计算复杂度, 同时提高了识别精度”; SFCD 损失“优化了样本拟合与类间可分性, 在有限训练数据下提升了一维 CNN 的识别性能”。PQS-FP 坐标系被应用于航空发动机缺陷检测、表情识别、军事目标检测等多个领域的模型复杂度-性能权衡分析。

(5) SAR 可解释识别 (代表作 5)

该论文发表于 IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 被 SAR 对抗防御与可解释性研究列为代表性方法。引文将其作为“最初为自然图像提出的基本防御基线”, 后续研究直接采用其 AT/TRADES 防御策略。该工作为深度模型在

SAR 图像识别中的可信部署提供了方法论支撑。

（三）专著与人才培养

项目团队将研究成果系统整理出版三部学术专著，由国防工业出版社和清华大学出版社出版。《弹道目标微多普勒效应与特征提取》（2016 年）为该领域奠基之作；《弹道目标微多普勒效应分析与特征提取技术》（2018 年）获国防科技图书出版基金资助；《直觉模糊时间序列分析》（2020 年）扩展了时序信号处理与推理应用。

相关成果支撑完成人入选军队科技英才、中国科协青年人才托举工程（军事领域）、陕西省青年科技人才托举工程、陕西省青年科技新星及陕西省“千人计划”（青年项目）。

（四）整体评价

该成果在弹道目标特征提取与智能识别领域形成了系统性的理论贡献，五篇论文构建了从底层信号处理到高层智能识别的完整技术链条。研究成果得到国内外高水平期刊与会议论文的广泛引用和正面评价，其中证据理论不确定性度量工作获省部级奖励并入选 ESI 高被引/热点论文，体现了成果的理论深度与学术影响力。三部专著构建了从经典信号处理到智能识别的完整知识体系，标志着该团队在该领域形成了持续二十余年的系统性积累。

代表性论文专著目录

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷页码/出版时间
1	High-Resolution Imaging and Micromotion Feature Extraction of Space Multiple Targets	IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS	韩立珣, 冯存前	2023, 59(5): 6278-6291
2	Quadruplet depth-wise separable fusion convolution neural network for ballistic target recognition with limited samples	Expert Systems With Applications	向前, 王晓丹, 来杰, 雷蕾, 宋亚飞, 贺佳星, 李睿	2024, 235, 121182: 1-21
3	Maximum mixture correntropy based outliner-robust nonlinear filter and smoother	Signal Processing	卢春光, 冯为可, 张永顺, 李智慧	2021,188: 108215
4	Translational Motion Compensation for Maneuvering Target Echoes With Sparse Aperture Based on Dimension Compressed Optimization	IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING	刘丰恺, 黄大荣, 郭欣荣, 冯存前	2022,60: 5227016
5	Uncertainty measure in evidence theory with its applications	Applied Intelligence	王晓丹, 宋亚飞	(2018) 48:1672–1688
6	弹道目标微多普勒效应与特征提取	国防工业出版社	冯存前, 贺思三, 童宁宁	2016.4
7	弹道目标微多普勒效应分析与特征提取技术	国防工业出版社	冯存前, 贺思三, 童宁宁, 李靖卿	2018.12
8	直觉模糊时间序列分析	清华大学出版社	范晓诗, 王亚男, 张雪超, 雷阳	2020.12

主要完成人情况：宋亚飞，冯存前，雷蕾，冯为可，王亚男，王晓丹
主要完成单位：中国人民解放军空军工程大学

完成人合作关系说明

本项目“弹道目标特征提取与智能识别方法研究”由空军工程大学防空反导学院团队牵头，联合西安邮电大学等单位共同完成。项目完成人包括宋亚飞、冯存前、雷蕾、冯为可、王亚男、王晓丹，六位完成人均长期从事雷达目标识别与智能信息处理研究，围绕弹道目标特征提取与智能识别形成了稳定而紧密的合作关系。

宋亚飞与王晓丹的合作始于 2014 年，共同开展了证据理论不确定性度量、直觉模糊集信息融合等基础理论研究，合作成果《Uncertainty measure in evidence theory with its applications》发表于 Applied Intelligence，获陕西省第十四届自然科学优秀论文三等奖，并入选 ESI 高被引论文与热点论文。冯存前作为团队核心成员，在弹道目标微多普勒效应分析与微动特征提取领域深耕二十余年，主持出版《弹道目标微多普勒效应与特征提取》（2016 年）、《弹道目标微多普勒效应分析与特征提取技术》（2018 年，获国防科技图书出版基金资助）两部专著，系统构建了从经典信号处理到智能识别的完整理论体系，与宋亚飞在人工智能安全、算法可解释性方面开展了长期合作，合作的论文《基于 NadaMax 更新与动态正则化的对抗样本迁移性增强方法》发表于“空军工程大学学报”。

雷蕾与王晓丹、宋亚飞在证据推理与智能识别领域有长期合作，合作成果发表于 Knowledge-Based Systems、系统工程与电子技术等期刊。冯为可主要研究方向为雷达信号处理与成像，与冯存前合作密切，共同参与了弹道目标高分辨 ISAR 成像及稀疏重构相关研究，合作成果发表于 Signal Processing 等期刊。王亚男主要研究方向为时序推理与智能识别，与宋亚飞在智能识别领域有长期合作，合作成果发表于 International Journal of Computational Intelligence Systems 等期刊。

团队成员围绕弹道目标特征提取与智能识别方向，共同承担国家自然科学基金项目（61876189、61703426、61273275 等）及陕西省人才计划项目，在 IEEE TAES、IEEE TGRS、ESWA、Applied Intelligence 等权威期刊合作发表多篇论文。五篇代表作中，冯存前、宋亚飞、王晓丹为多篇论文的通讯作者或共同作者；三部专著由冯存前、王亚男领衔完成。相关成果已获陕西省科技成果登记（登记号：9612026J1624、9612026J1674、9612026J1625、9612026J1695），充分体现了团队在理论研究、方法创新与应用验证方面的协同攻关能力与系统性贡献。