

基于多域特征融合与注意力机制的雷达有源干扰识别方法研究

柳鸿洁

江南机电设计研究所 贵州 贵阳 550009

【摘要】：复杂电磁对抗环境中，雷达有源干扰信号的样式、功率和调制参数容易随任务场景变化，单一时域或频域特征难以稳定区分压制式、欺骗式和复合式干扰。本文分析回波预处理、多域特征融合和注意力权重分配之间的耦合关系，提出以时域包络、频域谱峰和时频纹理共同表征干扰差异的识别方法，并给出样本设置、处理步骤、特征提取和输出比对的实现过程。该方法把注意力机制用于关键特征通道筛选，能够削弱低干噪比、类别相近和样本规模有限条件下的误判风险，为雷达抗干扰决策提供可解释的识别输入。

【关键词】：多域特征融合；注意力机制；雷达有源干扰；干扰识别；时频特征

DOI:10.12417/3041-0630.26.11.025

引言

雷达接收链路中的有源干扰会改变回波幅度、频谱分布和局部时频纹理，拖引、转发、调制噪声和假目标群还会破坏目标检测前的信号结构。单一人工特征或单通道网络在干噪比下降、参数漂移和多样式叠加时容易出现边界压缩，多域特征融合可把波形统计、谱峰能量和纹理块放入同一判别空间，注意力机制则给出通道、时刻和尺度贡献权重，使识别输出更适合抗干扰处置。

1 注意力机制干扰识别方法研究

1.1 雷达有源干扰回波信号预处理规则

有源干扰回波进入识别模型前，原始脉冲序列通常同时包含目标散射、接收机热噪声、旁瓣泄漏和干扰机调制成分。预处理规则应先以雷达脉冲重复周期和距离门为基准完成时间对齐，避免拖引干扰造成样本峰值在不同片段中漂移；再以带通滤波、异常幅值截断和噪声底估计压缩非干扰随机扰动，使后续网络接收的是同一尺度下的可比样本^[1]。幅度归一不能简单抹平强干扰特征，适合保留峰均比、脉冲宽度和局部能量突变等相对量，把绝对功率差异转化为稳定的形态差异。

1.2 时频空多域特征融合提取方式

时域特征负责描述干扰包络、脉冲间隔和能量起伏，频域特征反映带宽占用、谱峰离散度和调制边带，时频图像能够表现切片转发、扫频压制和密集假目标在局部时间窗口内的纹理变化。三类特征的采样长度、归一化口径和通道维度应在融合前统一，否则高维图像特征会掩盖低维统计量，频域峰值也可能被平均池化削弱^[2]。较稳妥的做法是为每一域设置独立浅层编码器，分别提取局部形态后再进行通道拼接或张量对齐，使融合层接收的不是简单堆叠数据，而是已经去除尺度冲突的干扰表征。

1.3 注意力识别权重分配方法

注意力权重分配的核心不是增加网络深度，而是在多域特征进入分类器前确定哪些时间片、频带和通道更能区分干扰类别。调频噪声的连续谱扩展、距离欺骗的峰值拖移、密集假目标的多峰结构和切片转发的间断纹理，分别对应不同的关键区域；通道注意力可压低冗余特征，空间或时序注意力可把权重集中到类别差异最明显的位置。权重矩阵还应与分类置信度同步检查，当高权重区域落在噪声底或目标主瓣之外时，模型输出即使置信度较高，也应在抗干扰决策中保留人工复判或二级模型确认。

2 雷达有源干扰识别方法实现过程

2.1 雷达有源干扰识别样本类别设置

样本类别设置直接决定识别方法能否覆盖实际对抗场景。压制式干扰可按调频噪声、扫频噪声和阻塞噪声划分，欺骗式干扰可按距离拖引、速度拖引、切片转发和密集假目标划分，复合干扰则应标注主导机制和伴随扰动，避免把一个混合样本强行归入单一类别^[3]。训练、验证和测试样本应按干噪比区间、调制参数范围和雷达工作体制分层抽取，低干噪比样本不能只出现在训练集中，否则模型会把噪声适应能力误判为泛化能力。

2.2 复杂回波信号预处理执行步骤

复杂回波预处理应把工程可执行性放在模型输入之前。接收数据按脉冲号、距离单元和采样点建立三维索引后，先剔除同步丢失、饱和截顶和空窗样本，再以滑动窗口估计噪声底并修正异常能量尖峰。对欺骗干扰样本，距离门对齐应保留假目标相对位移；对压制干扰样本，频带裁剪应保留带宽扩展边缘。原始回波经过脉冲对齐后形成同一距离单元上的多脉冲片段，噪声抑制与幅度归一把随机波动压缩到可比范围，末端样本片段仍保留局部峰值和振荡形态，预处理目标是保持干扰结构而

非把波形修平。雷达回波预处理链条见图1。

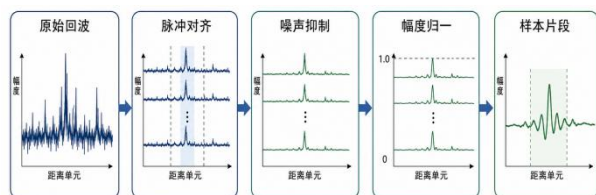


图1 雷达有源干扰回波预处理流程示意

图1中，原始回波经过脉冲对齐后形成同一距离单元上的多脉冲片段，噪声抑制与幅度归一把随机波动压缩到可比范围，末端样本片段仍保留局部峰值和振荡形态，说明预处理的目标是保持干扰结构而非把波形修平。

2.3 多域融合特征提取执行过程

多域融合特征提取可采用三条并行支路：时域支路提取峰均比、包络斜率和脉冲间相关，频域支路提取中心频率偏移、谱峭度和带宽占用，时频支路提取短时傅里叶图或伪魏格纳分布中的纹理块。各支路输出先通过批归一化和线性映射压缩到同一特征维度，再以拼接张量输入融合层。三分支结构使融合层同时保留通道、频率和样本维度，分类器在降维后读取跨域共同变化，而不是某一域的孤立峰值。时频空多域融合拓扑见图2。

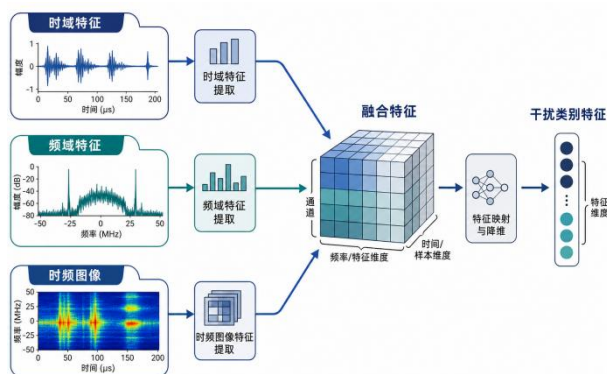


图2 时频空多域特征融合拓扑示意

参考文献：

- [1] 李宁,王赞,舒高峰,等.孪生网络辅助下多域特征融合的雷达有源干扰识别方法[J].电子与信息学报,2025,47(6):1837-1849.
- [2] 洪方磊,陈虹,陈海彬.基于神经网络与多域特征融合的深度伪造检测监测技术研究及应用[J].广播电视网络,2026,33(7):26-29.
- [3] 于生飞,纪成亮,张勇,等.基于多域特征融合与 XGBoost 的基础环式风电机组基础脱空损伤判定评估[J].振动与冲击,2026,45(11):47-57.

图2中，时域、频域和时频图像三条支路在进入融合特征张量前分别完成提取，中央张量同时保留通道、频率和样本维度，右侧降维映射把跨域共同变化转换为类别特征，避免某一单域峰值独占分类依据。

2.4 注意力权重驱动的结果输出

识别输出阶段可把融合特征送入注意力模块，得到类别相关的权重矩阵和置信度向量。方法情景中，调频噪声、距离欺骗、密集假目标和切片转发的注意力权重点值分别为0.36点、0.24点、0.18点和0.22点，识别置信度点值对应0.82点、0.57点、0.29点和0.71点；以处置触发阈值0.60点比较时，0.82点和0.71点高于阈值，0.57点和0.29点低于阈值，调频噪声和切片转发进入优先处置队列，距离欺骗保留二级判别，密集假目标继续核对峰值数量和间隔稳定性。

2.5 有源干扰识别方法性能比对

性能比对不宜只报告总体准确率，还应同时观察低干噪比、相邻类别和未知干扰进入时的误判类型。单域卷积网络通常在样本充足、干扰形态稳定时表现较好，但遇到频带漂移或切片参数变化会出现特征失配；多域融合模型能够减少单一特征失效带来的波动，注意力机制进一步把判别重点压缩到关键通道。用于工程部署时，模型复杂度、推理时延和置信度可解释性应与识别准确性共同比较，只有在雷达处理机资源、样本更新周期和抗干扰策略接口均能承受时，方法输出才具备连续使用条件。

3 结语

多域特征融合与注意力机制结合后，雷达有源干扰识别不再依赖单一波形特征，而是把时域包络、频域能量和时频纹理共同转化为类别判别依据。预处理阶段保证样本尺度一致，融合阶段保留跨域互补信息，注意力阶段突出调制结构、峰值拖移和局部纹理等关键差异。该方法适合用于压制式、欺骗式和复合干扰的在线识别，但工程部署仍应补充低干噪比、未知样式和不同雷达体制下的样本，结合时延、算力和置信度边界确定抗干扰策略接口。