

雷达信号时频分析与深度学习融合处理方法

王欣璐

中国电子科技集团公司第二十二研究所，山东青岛，266107；

摘要：雷达信号多呈现非平稳特征，且易叠加噪声、杂波等干扰，传统时频分析虽能刻画信号时间与频率的分布关系，却受分辨率局限与抗干扰能力不足的影响，难以精准提取目标信号特征。深度学习具备强大的自主特征挖掘能力，可弥补时频分析短板，二者融合能实现“时频特征精准表征-深层差异自主识别-目标信号高效提取”的协同效应。文章阐述雷达信号时频分析与深度学习融合的核心逻辑及融合前提，梳理二者融合的核心处理方法，明确融合处理的实施流程，为复杂场景下提升雷达信号处理精度、强化目标探测能力提供参考。

关键词：雷达信号；时频分析；深度学习；融合处理；特征提取

DOI：10.69979/3041-0673.26.03.005

引言

雷达靠捕捉目标反射的回波信号来探测目标，而运动目标（比如高速飞行的空中目标、灵活移动的地面目标）的回波信号，常会因为自身运动状态变化，出现频率随时间波动的非平稳特征。传统时频分析没法自己区分目标和干扰在时频上的不同，必须靠人提前设定特征，适配不同场景的能力不足。深度学习不用依赖固定的特征模板，能自己挖掘数据里隐藏的规律，正好能弥补传统时频分析的缺点。所以，找到雷达信号时频分析和深度学习结合的处理方法，成了突破复杂信号处理瓶颈的关键。

1 雷达信号时频分析与深度学习融合的核心逻辑及融合前提

1.1 融合的核心逻辑

两者融合，以“时频特征表征-特征适配转换-深层特征挖掘-目标信号输出”为核心逻辑，形成一套完整的信号处理流程，每个步骤各司其职又相互衔接，具体如下：第一步，用时间频率分析处理原始雷达信号（里面既有目标信号，也有干扰信号），把原本只有“幅度随时间变化”的一维时域信号，转换成二维的时频表现形式，比如时频图像或者时频矩阵。第二步，对提取出的时频特征做标准化适配处理，统一它的尺寸、格式和数据维度，确保符合深度学习模型的输入要求。比如时频图像尺寸太大或太小，就缩放、裁剪到模型要的尺寸；时频矩阵维度不对，就通过插值、增删维度调整；同时把数据格式转换成模型能识别的类型，把能量值等数据的范围归一化（比如统一到0-1之间），避免因为格式不兼容，导致时频特征和深度学习模型脱节，没法正常输入。第三步，靠深度学习模型对适配好的时频特

征做深层挖掘，自己学会区分目标信号和干扰（比如噪声、杂波）在时频域的本质不同。比如模型会先通过浅层网络，提取时频特征的基础信息，像时频图像的边缘、时频矩阵的局部数值规律；再通过中层网络，找这些特征的关联信息，比如目标时频轨迹是不是连续的、干扰能量分布是不是随机的；最后通过深层网络，挖掘出更本质的差异——比如目标时频轨迹的频率变化符合运动规律，而欺骗干扰的频率变化很突兀，进而自己构建出“目标和干扰识别模型”，精准把两者分开，解决传统时频分析“要靠人设定特征、没法自主区分”的问题。第四步，通过模型输出目标信号的识别结果，再把结果转换成雷达实际需要的信息，完成整个信号处理。比如模型先输出“有没有目标”“目标在时频图上的位置”，再通过专门的解析步骤，算出目标的运动速度（靠时频轨迹的频率变化算）、大致距离（靠信号接收时间和频率特征关联算），最后校验一下结果是不是符合物理规律（比如速度不会远超常见目标的合理范围），确保输出的目标信息精准、有效。

1.2 融合的主要前提

雷达信号时频分析和深度学习要顺利融合，还得满足三个关键前提，少一个都可能导致融合效果变差，甚至没法融合，具体如下：

1.2.1 高质量的时频特征输出

时频分析是融合流程的“第一步”，它输出的时频特征质量，直接决定深度学习的输入基础好不好——要是时频特征分辨率低、干扰多、目标特征模糊，就算用再厉害的深度学习模型，也挖不出有用的目标信息，所以这是融合的首要前提，要从两方面保障：一方面，得选和雷达信号特性匹配的时频分析方法。不同的雷达信号，非平稳特征不一样——比如高速目标的信号频率变

得快,低速目标的变得慢;强信号能量集中,弱信号能量分散,而不同时频分析方法的优势也不同,必须针对性选。比如处理高速目标(像导弹、战斗机),就选小波变换,它的时间分辨率高,能精准抓出频率突然变的细节,把目标的时频轨迹画清楚;处理强杂波里的中低速目标(像地面汽车、海面船),就选维格纳-威利分布,它的频率分辨率高,能分清目标和杂波在频率上的细微差别,不让杂波盖住目标;要是不知道目标运动状态,就选改进的短时傅里叶变换,动态调整参数,兼顾时间和频率分辨率,确保目标特征清晰。另一方面,时频分析过程中要加基础去噪处理,减少背景噪声对时频特征的干扰。雷达原始信号里的背景噪声(比如雷达接收机自身的热噪声),会在时频域形成随机的能量点,和目标特征叠在一起,导致目标特征变模糊。

1.2.2 适配的深度学习模型与数据支撑

深度学习是融合流程的“核心”,模型选得对不对、有没有足够好的数据训练,直接影响特征挖掘效果,这是融合的核心前提,要从两方面做好:一方面,选和时频特征类型、雷达处理需求匹配的深度学习模型。时频特征的形式不一样,适合的模型也不同,不能乱选:如果时频特征是二维图像(比如把时频能量分布做成彩色图),就选擅长处理图像的模型,比如卷积神经网络(CNN),它能很好地提取图像的边缘、纹理等特征,适合找时频图像里的目标区域;如果时频特征是时频矩阵,而且和时间顺序相关(比如按时间先后排列的频率数据),就选擅长处理时序数据的模型,比如循环神经网络(RNN),它能捕捉不同时间点特征的关联,适合找目标时频轨迹的变化规律。另一方面,要有海量、高质量的数据支撑模型训练。深度学习靠“学数据”提升能力,数据不够或质量差,模型就会“学不会”或“学错”,所以数据要满足两个要求:一是覆盖范围全,要包含雷达常见的目标信号时频数据(比如不同类型、不同速度目标的时频图像/矩阵)、多种干扰叠加的时频数据(比如噪声+杂波、杂波+欺骗干扰的混合数据),还要包含不同场景下的数据(比如晴天、雨天、山地、海面),确保模型学完能适配各种情况;二是标注清晰准确,每一组数据都要清楚标注“哪部分是目标信号、哪部分是干扰、干扰是什么类型”,比如在时频图像上圈出目标区域,标注“这是飞机目标,干扰是地面杂波”,可以靠“人工标注+机器校验”的方式确保准确,避免标注错了,导致模型学错特征,没法正确区分目标和干扰。

1.2.3 二者的协同适配性

时频分析和深度学习要融入同一套信号处理流程,还得在“数据格式、处理时序、参数调整”上相互适配,不然流程会断、效果会差,这是融合的必要前提,具体要做好三点:第一,数据格式适配,就是时频特征的格式、维度,要和深度学习模型的输入要求完全一致。比如模型要求输入 224×224 像素的灰度图,时频图像就要调整到这个尺寸,并且转换成灰度格式;模型要求输入3维的时序矩阵,时频矩阵就要从2维扩展成3维,避免格式冲突,导致特征没法输入模型。第二,处理时序适配,就是时频分析的处理速度,要和深度学习模型的计算速度匹配,确保雷达信号“接收-时频转换-深度处理”能实时完成,不卡顿、不脱节。比如雷达每秒接收100帧信号,时频分析就要每秒处理完100帧,深度学习也要每秒计算完100帧,要是时频分析处理慢了,信号就会堆积;要是模型计算慢了,就会延迟输出结果,没法满足雷达实时探测的需求。参数协同适配,就是时频分析的关键参数(比如处理信号用的窗函数类型、窗的长度),和深度学习模型的参数(比如网络层数、卷积核大小),要同步调整、相互适配。比如为了提升时频分辨率,把时频分析的窗长调小了,时频特征的细节就变多了,这时候就要微调模型的参数(比如增加卷积核数量),让模型能适应新的特征细节;反过来,要是调整了模型的网络层数,提升了特征挖掘精度,也可以适当优化时频分析的参数,让输出的特征更精准,确保两者参数调整后,融合效果能同步提升,而不是相互影响、效果下降。

2 雷达信号时频分析与深度学习融合的核心处理方法

2.1 时频图像-深度学习融合处理方法

适合时频特征呈二维图像的场景,核心是“图像化-提图像特征-识目标”。

先通过时频分析,把原始雷达信号转成二维时频图像,用像素亮度表示信号能量,直观区分目标和干扰的时频分布;再对图像做预处理(缩放尺寸、增强对比度),突出目标区域、弱化干扰像素;最后把处理好的图像输入擅长图像识别的深度学习模型,模型自主学习目标图像特征(轨迹、能量分布),分清干扰(噪声杂乱像素、杂波固定纹理),输出识别结果,还能定位目标在图像中的位置,反推目标出现时间、瞬时频率。

2.2 时频序列-深度学习融合处理方法

适合时频特征按时序关联的场景(如目标连续运动的信号),核心是“时序化-挖时序特征-跟目标”。先

把连续雷达信号按时间分段，每段用时频分析生成时频矩阵，再按时间顺序排成时频序列；然后统一每个矩阵的维度和数据范围，保证时序连续；最后把序列输入擅长处理时序数据的深度学习模型，模型学习序列中时频特征的变化规律（目标轨迹连续、能量平稳波动），分清目标和干扰序列（噪声随机、杂波固定重复），既能识别目标，还能跟踪特征变化，反推目标速度、加速度，满足雷达跟踪需求。

2.3 时频特征增强-深度学习融合处理方法

适合低信噪比、多干扰叠加的场景，核心是“增强特征-挖差异-提微弱目标”。先通过时频分析生成初始特征，再做增强处理（时频滤波、能量加权），抑制干扰（降杂波能量）、强化微弱目标（提目标能量）；然后把增强后的特征（图像或序列）输入深度学习模型，模型重点学目标和干扰的深层差异，就算目标特征弱，也能捕捉到；最后迭代优化增强参数和模型参数，进一步提升微弱目标提取精度，适合雷达探测远距、小目标。

3 雷达信号时频分析与深度学习融合处理的实施流程

3.1 前期准备阶段

核心是“理需求、备数据、选工具”。理需求：明确雷达处理目标（识别、跟踪、提微弱目标）、工作场景（高空、地面）和干扰类型，定核心指标（识别精度、处理速度）；备数据：按需求采雷达信号，转成对应时频特征（图像/序列），清洗、标注成高质量数据集；选工具：选适配的时频分析工具和深度学习框架，保证支持所需方法和模型，计算高效。

3.2 融合建模阶段

核心是“生成时频特征、建模型、集成二者”。先用选好的时频工具处理原始数据，生成适配特征，优化时频参数（窗长、窗函数）；再用深度学习框架建适配模型，按特征形式选结构、设初始参数；最后把时频处理模块和模型集成，搭成融合系统，实现“时频转换-特征预处理-模型输入-结果输出”自动化，确保协同运行。

3.3 验证优化阶段

核心是“训模型、验效果、迭代参数”。把标注好的数据集分成训练集和验证集，用训练集训模型，让模型学目标和干扰的差异；用验证集测性能，评核心指标，若不达标，找原因（特征分辨率差、模型参数错）；针对性优化：调时频参数提特征质量，改模型结构和参数强挖掘能力，反复训和验，直到效果满足雷达需求。

3.4 落地应用阶段

核心是“系统部署、实时调试、持续维护”，确保融合处理在雷达中稳定运行。首先，将优化后的融合处理系统部署至雷达信号处理硬件（如专用计算芯片），确保系统与雷达的信号接收、后续处理模块适配，实现链路通畅；随后，进行实时调试，用雷达实际接收的信号测试系统，调整处理时序与参数，解决实时运行中的问题（如时序脱节、特征适配偏差）；最后，建立持续维护机制，定期收集系统运行数据，监测处理效果，若出现新干扰或场景变化，补充新数据训练模型，更新时频分析参数，确保融合处理效果长期稳定。

4 结语

雷达信号时频分析与深度学习的融合，打破了传统时频分析的分辨率局限与深度学习的特征输入依赖，通过协同互补实现复杂场景下目标信号的精准提取。明确二者融合的核心逻辑与前提，采用适配的融合处理方法，遵循规范的实施流程，可充分发挥融合效能，提升雷达信号处理的精度与实时性。此类融合处理思路贴合雷达探测的实际需求，不仅能解决低信噪比、多干扰场景下的目标提取难题，还能为雷达信号处理技术的升级提供新方向，助力雷达在国防、民用等领域更好地发挥目标探测与跟踪作用。

参考文献

- [1] 张治斌, 金苑苑, 李思佳, 党伟. 基于图信号处理的无线网络异常节点检测方法[J]. 计算机科学与应用, 2024, 14(3): 201-209.
- [2] 廖可非, 王海军, 谢宁波. 基于图信号处理的频控阵MIMO雷达动目标检测方法[J]. 现代电子技术. 2024(23): 62-68.
- [3] 陈小龙, 何肖阳. 雷达微弱目标智能化处理技术与应用[J]. 雷达学报(中英文). 2024(03): 501-524.