

雷达信号处理中 AI 自适应滤波算法的应用

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：雷达信号处理的核心目标是从复杂干扰环境中提取精准目标信号，传统自适应滤波算法受固定模型与参数限制，难以适配干扰类型多变、信号特征动态变化的场景，滤波效果与实时性不足。AI 自适应滤波算法依托数据驱动与自主学习能力，可动态学习雷达信号与干扰的特征，自主调整滤波参数，突破传统算法局限。文章阐述雷达信号处理中 AI 自适应滤波算法的核心优势与应用前提，分析算法在干扰抑制、目标信号增强及滤波参数优化中的具体应用路径，梳理算法应用的保障措施，为提升雷达信号处理精度与实时性、强化雷达目标探测能力提供参考。

关键词：雷达信号处理；AI 自适应滤波算法；干扰抑制；目标信号增强；参数优化

DOI：10.64216/3080-1508.26.01.048

引言

雷达通过发射和接收电磁信号来探测目标，信号处理过程容易受各种干扰影响，主要分自然干扰（比如噪声、杂波）和人为干扰（比如欺骗干扰、压制干扰）。这些干扰会把目标信号盖住，导致雷达定位不准、探测距离变短，甚至找不到目标。AI 自适应滤波算法，把人工智能的学习能力和自适应滤波的动态调整能力结合起来，不用依赖固定模型。它能通过学习大量雷达信号数据，自己掌握信号和干扰的特征规律，实时优化滤波方法。所以，找到这种算法在雷达信号处理里的应用方式，成了提升雷达抗干扰能力、保证目标探测精准的关键方向。

1 雷达信号处理中 AI 自适应滤波算法的核心优势与应用前提

1.1 核心优势

1.1.1 动态适配干扰与信号变化，抗干扰能力更强

传统自适应滤波算法靠预设模型，遇到不知道的或突然变的干扰，就没法快速适应。而 AI 自适应滤波算法能实时学习，及时抓住雷达信号和干扰的特征变化。算法运行时，会一直收集雷达接收的信号数据，自己分析目标信号（比如目标反射的信号）和干扰（比如噪声、杂波）的不同特征。要是干扰类型突然变了，或者目标信号特征改了，不用人插手，它能自己更新识别模型，调整滤波参数，精准把干扰和目标信号分开，大大提升雷达在复杂多变干扰环境下的抗干扰能力，避免传统算法“模型对不上”导致的滤波失效。

1.1.2 减少人工依赖，提升滤波实时性

传统自适应滤波算法的参数，要靠人根据经验设定，过程麻烦还慢。尤其干扰和信号变快的时候，人根本来不及调参数，滤波就会滞后。AI 自适应滤波算法能自己学习、自己做决定，从“收集信号-分析特征-调参数-执行滤波”，全流程不用人参与；同时，它还能优化自身网络结构（比如做轻量化处理），缩短学习特征和计算参数的时间，确保滤波速度跟雷达信号处理节奏一致，大大提升实时性，满足雷达实时探测目标的需求。

1.1.3 适配复杂多干扰场景，滤波精度更高

雷达实际工作时，经常遇到多种干扰叠在一起的情况（比如噪声+杂波+欺骗干扰）。传统自适应滤波算法没法同时精准去掉多种干扰，往往去掉一种，还剩另一种，导致目标信号提取得不够准。AI 自适应滤波算法能从多个维度学习特征，同时认出不同干扰的区别，建立专门的多干扰分离模型。滤波时，能针对性抑制每种干扰，不留下残留；而且它还能学习目标信号在多种干扰叠加时的变化规律，减少滤波时对目标信号的损伤，让提取的目标信号更完整、更准，提升雷达定位和识别目标的精度。

1.2 应用前提

1.2.1 海量高质量训练数据支撑

AI 自适应滤波算法的学习能力，全靠大量高质量的训练数据，数据要覆盖这几类内容：雷达常见的目标信号类型（比如不同距离、速度目标的反射信号）、各种干扰类型（比如自然干扰和人为干扰），还有不同场景下（比如晴天、雨天、复杂地形）的信号数据。同时，数据要经过清洗和标注：删掉没用的、错的数据，清楚

标注“哪部分是目标信号、哪部分是干扰信号”，还要标注它们的特征。这样算法才能通过学习，精准掌握信号和干扰的区别，不至于因为数据不够或质量差，学不到位，滤波效果下降。

1.2.2 适配的硬件计算能力

AI 自适应滤波算法要实时运行，得靠性能强的硬件支撑，尤其是多种干扰叠在一起、信号数据量大的时候，算法要快速完成“提取特征-计算参数-执行滤波”，对硬件的运算速度、存储容量要求很高。首先，硬件要装高性能处理器（比如专用 AI 芯片），提升算法学习特征和优化参数的速度；其次，要有足够的存储空间，用来存训练数据、实时信号数据和算法模型参数，避免存不下导致数据丢了或算法断了；另外，硬件要有稳定的信号接口，能实时接收雷达信号，还能把滤波后的信号快速传给雷达后续处理模块，保证整个信号处理流程顺畅。

1.2.3 算法与雷达系统的适配性

AI 自适应滤波算法要融入雷达信号处理流程，必须和雷达系统的工作参数、信号处理步骤适配。算法要适配雷达的信号类型（比如脉冲信号、连续波信号）、发射频率、接收带宽等参数，这样才能正确解读雷达接收的原始信号；同时，算法的输入和输出格式，要和雷达信号处理的前后模块匹配——输入是雷达接收的原始信号数据，输出是滤波后的目标信号数据，而且格式要能让雷达后续的目标检测、定位模块直接用，避免格式不兼容断了信号处理流程；另外，算法要适配雷达的工作模式（比如搜索模式、跟踪模式），在不同模式下调整学习和滤波的方法，确保滤波效果符合雷达的探测需求。

2 雷达信号处理中 AI 自适应滤波算法的具体应用路径

AI 自适应滤波算法在雷达信号处理里的应用，主要解决“抑制干扰、增强目标信号、优化滤波参数”三个核心需求，通过针对性的方法，提升信号处理的精准度和实时性。

2.1 干扰抑制：精准分离干扰与目标信号

干扰抑制是雷达信号处理的核心，AI 自适应滤波算法按“多特征识别-针对性抑制-清残留干扰”的步骤，实现精准抑制。首先，算法用神经网络提取雷达信号的多维度特征（比如幅度、频率、相位、时域波形），同时调用训练好的干扰特征库，对比认出当前的干扰类型

（比如噪声、杂波、欺骗干扰），明确各类干扰的参数；然后，针对不同干扰用不同方法抑制：对噪声干扰，学习它的随机特征，做自适应噪声抵消，把噪声从信号里分开；对杂波干扰（比如地面、海面杂波），学习它的空间分布和多普勒特征，做自适应杂波抑制，去掉杂波对目标信号的遮挡；对欺骗干扰（比如假目标），找出真假目标信号的区别（比如相位变化规律），精准删掉假目标信号。最后，算法对滤波后的信号再检查一次，看有没有残留干扰。如果有，就反复调整抑制参数，再做一次干扰清除，直到干扰残留量符合雷达探测的要求。

2.2 目标信号增强：减少信号损伤，提升信号完整性

目标信号在传输和接收时，容易被干扰、噪声影响，出现幅度变小、特征失真的问题。AI 自适应滤波算法按“重构目标特征-修复信号损伤-增强信号幅度”的步骤，提升信号的完整性和可识别性。首先，算法学习真实目标信号的特征规律（比如不同运动状态下，目标反射信号的幅度、频率变化），建立目标信号特征模板；然后，把初步滤波后的目标信号和模板对比，找出被干扰损伤的部位（比如幅度骤降、相位失真），用神经网络重构这些部位的特征，修复失真；同时，在不放大残留干扰的前提下，适当提高目标信号的幅度，让信号更清晰，方便雷达后续模块识别。另外，对远距离的微弱目标信号（比如远距目标反射的信号），算法能用深度学习放大微弱信号的特征，同时抑制背景噪声，避免微弱信号被噪声盖住，提升雷达对远距、小目标的探测能力。

2.3 滤波参数优化：实时动态调整，适配场景变化

滤波参数的好坏直接影响滤波效果，AI 自适应滤波算法按“感知当前场景-分析参数需求-动态更新参数”的步骤，自主优化参数，不用人插手。首先，算法实时了解雷达的当前场景，包括干扰的类型和强度、目标信号的特征（比如距离、速度）、雷达的工作模式（搜索/跟踪），同时监测当前的滤波效果（比如干扰残留多少、目标信号损伤程度）；然后，算法通过内置的决策模型，分析当前需要什么样的滤波参数（比如滤波阶数、收敛因子、增益系数）：比如干扰变强了，就增大收敛因子，让算法更快适应干扰；目标信号弱了，就调整增益系数，增强目标信号又不放大噪声；雷达在跟踪模式时，就降低滤波阶数，让参数调整更快，适应目标的动态变化。最后，算法按分析结果更新滤波参数，再监测更新后的效果。如果效果不好（比如干扰残留还超标），

就再调整参数,直到滤波效果符合当前场景的需求,避免传统算法“参数固定”不适应场景变化的问题。

3 雷达信号处理中 AI 自适应滤波算法应用的保障措施

为确保AI自适应滤波算法在雷达信号处理中稳定、高效应用,需从“数据保障、技术保障、系统融合保障”三个维度构建保障体系,化解应用中的潜在问题,充分发挥算法效能。

3.1 数据保障:构建动态更新的高质量数据集

数据是算法应用的基础,要通过“数据采集-质量管控-动态更新”,保证数据充足、准确、及时。一是拓宽采集范围,覆盖雷达常见工作场景(不同地形、气象、干扰类型)、目标类型(空中、地面、海上目标)及工作模式,确保数据能支撑算法应对多样场景;采集时同步记录场景参数(如干扰强度、目标速度),为标注和学习提供依据。二是强化质量管控,制定数据清洗与标注标准,删掉冗余、错误数据(如信号失真严重的数据);用人工复核加自动校验的方式,确保“目标信号-干扰信号”标注准确,避免算法学错;同时统一数据格式和特征维度,方便算法高效学习。三是建立动态更新机制,随着雷达场景拓展和新型干扰出现,持续补充新数据,定期更新训练数据集,确保算法能学到最新的信号和干扰特征,不因为数据过时而适配性下降。

3.2 技术保障:优化算法性能与硬件适配性

技术保障要聚焦“算法优化-硬件升级-故障排查”,确保算法稳定、高效运行。一是优化算法性能,针对雷达实时性需求,用轻量化神经网络,简化计算流程,减少特征提取和参数优化的时间,提升运行速度;同时引入正则化、剪枝等技术,避免算法过拟合(只适配某类干扰,其他不行),增强泛化能力,让算法在不同场景下都能稳定滤波。二是升级硬件适配能力,按算法需求配专用AI芯片和高性能存储设备,提升运算速度和存储容量,确保能实时处理海量信号;优化硬件接口,让硬件和雷达、算法之间信号传输顺畅,减少延迟;定期维护、校准硬件,避免故障导致算法中断或数据丢失。三是建立故障排查机制,实时监测算法运行状态和滤波效果,设定预警阈值(如干扰残留超标、参数调整异常);一旦超出阈值,自动预警并记录故障原因(如数据异常、算力不足);技术人员按预警和日志快速排查解决,让算法尽快恢复正常。

3.3 系统融合保障:实现算法与雷达系统的深度适配

系统融合保障要通过“适配性设计-联调测试-持续优化”,让算法融入雷达信号处理流程,不影响整体运行。一是做适配性设计,算法开发阶段就结合雷达工作参数(如信号频率、带宽)和处理流程,设计输入输出格式、运行时序,确保能无缝接入“接收信号-滤波-目标检测-定位”链路,不因为时序不匹配而延迟。二是强化联调测试,应用前搭建联调平台,模拟不同场景,测试算法和雷达前后模块的协同效果(如滤波后的信号能否被检测模块精准识别);针对发现的问题(如格式不兼容、时序偏差),及时调整算法或雷达参数,直到协同顺畅、滤波效果达标。三是建立持续优化机制,算法应用后,定期收集实际运行数据(如滤波效果、稳定性)和用户反馈(如定位精度变化),分析融合中的不足(如某场景下适配性差),针对性优化算法或调整系统参数,让融合效果持续提升,满足雷达长期、复杂的工作需求。

4 结语

AI自适应滤波算法依托动态学习、自主决策能力,突破传统自适应滤波算法的模型与参数局限,在雷达信号处理的干扰抑制、目标信号增强、参数优化中发挥关键作用,可大幅提升雷达的抗干扰能力与目标探测精度,适配复杂多变的工作场景。通过构建动态更新的高质量数据集、优化算法与硬件性能、实现算法与雷达系统深度融合,可确保算法稳定、高效应用,充分释放其效能。此类应用路径与保障措施,贴合雷达信号处理的实际需求,不仅能提升单个雷达的探测能力,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作用。

参考文献

- [1]李钦,刘伟,牛朝阳等.低信噪比下基于分裂EfficientNet网络的雷达信号调制方式识别[J].电子学报,2023,51(03):675-686.
- [2]王彬,高冰,谷沛尚等.基于FastICA的低信噪比雷达信号分选算法[J].东北大学学报(自然科学版),2019,40(11):1555-1560.
- [3]郭立民,寇韵涵,陈涛等.基于栈式稀疏自编码器的低信噪比下低截获概率雷达信号调制类型识别[J].电子与信息学报,2018,40(04):875-881.