

复杂环境下雷达信号处理算法的优化与创新

何晨凯

四川九洲电器集团有限责任公司 四川 绵阳 621000

摘要：针对复杂空域与电磁场景下雷达信号畸变严重、多维度复合干扰叠加的现实问题，梳理不同场景中信号传播畸变、复合干扰作用与杂波失真的内在规律，剖析传统信号处理算法在滤波适配、目标检测、参数估计等环节的固有局限，本文围绕自适应迭代优化、多维联合处理、智能算法创新等方向提出针对性改进路径，为复杂环境下雷达系统信号处理能力提供可行的技术参考。

关键词：复杂雷达环境；信号畸变；自适应滤波；多域特征融合；实时信号处理

引言：雷达作为当前探测感知体系的核心装备，在航空监测、气象预警等多个领域承担着不可替代的作用。随着应用场景的不断拓展，各类复杂地形遮挡、密集电磁干扰与动态杂波环境对雷达信号的稳定接收与解析形成了显著制约，传统处理模式的适配缺口持续凸显。聚焦复杂条件下雷达信号处理的现实痛点开展技术优化与方法创新，对补齐现有装备的性能短板、强化复杂场景下的探测感知稳定性具备重要的实践价值。

1 复杂环境下雷达信号传输与干扰特征分析

1.1 复杂场景雷达信号传播畸变特征

复杂空域与地表场景会改变雷达电磁波的固有传播路径，打破自由空间的传播规律。地形遮挡、地表起伏与空域介质不均匀分布，都会对雷达发射信号产生持续性的调制影响。电磁波在穿透、反射与散射的过程中，会出现幅度衰减、相位偏移与时延波动等各类畸变现象。不同场景的空间结构与介质属性存在明显差异，畸变的表现形式也会产生明显区分^[1]。近距离密集遮挡场景易造成信号能量的快速损耗，远距离空域环境则会引发信号相位的连续扰动。各类畸变问题会改变原始信号的特征参数，造成信号波形紊乱，对后续信号解析与处理流程形成直接影响。

1.2 多维复合干扰的作用机制分析

现代复杂电磁环境中，单一干扰模式逐步被多维复合干扰取代。各类有源干扰与无源干扰相互叠加，从时域、频域、空域多个维度对雷达信号形成压制与扰乱。有源干扰通过主动发射电磁信号，挤占雷达工作频段，覆盖有效信号的能量特征。无源干扰依托环境中的散射介质与遮挡物体，改变信号传播形态，生成大量虚假信号分量。多维度干扰会改变雷达信号的特征分布结构，打乱信号原本的特征规律，提升有效信号的识别与分离难度。

1.3 杂波环境下雷达信号失真规律

地杂波、海杂波与气象杂波是雷达工作过程中最主要的干扰来源，这类杂波信号具备随机性与广谱性特点。杂波信号会与目标回波信号混合叠加，改变原始回波的能量分布与波形结构。不同环境的杂波强度、分布范围与波动状态存在显著区别，对应的信号失真程度也各不相同。静态杂波会造成固定的信号偏移问题，动态杂波会引发信号参数的实时波动，导致有效信号特征被杂波掩盖，破坏信号本身的完整性与有序性。

1.4 非平稳环境对信号处理算法的约束机制

自然环境与电磁环境的动态变化，造就了雷达工作场景的非平稳特性。环境参数的实时波动，会让雷达接收的信号状态始终处于动态变化之中。传统信号处理算法依托固定的信号参数模型与处理逻辑开展工作，难以适配动态变化的非平稳场景。环境状态的无序波动，会限制算法对信号特征的提取能力，压缩算法的有效工作区间^[2]。非平稳特性带来的动态约束，直接限制常规信号处理算法的工作适配性，成为复杂环境下雷达信号精准处理的主要制约条件。

2 传统雷达信号处理算法的适配性缺陷剖析

2.1 信号滤波算法的场景适配局限

传统雷达信号滤波算法依托固定运算模型完成噪声与干扰滤除工作，整体设计针对平稳、简单的电磁场景搭建。这类算法依靠固定阈值与线性运算规则完成信号筛选，对单一、平稳的噪声分量具备基础滤除能力。复杂环境产生的干扰具备非平稳、多形态、强叠加的特点，和常规噪声的分布特征存在本质区别。固定的处理参数无法跟随环境状态完成自主调整，难以区分干扰分量与微弱目标回波的特征差异。滤波处理过程容易出现过度降噪或降噪不彻底的问题，造成有效信号细节丢失、残留干扰分量等问题，无法适配多变的复杂工作场景。

2.2 目标检测算法的环境抗扰短板

常规雷达目标检测算法依赖稳定的信号能量特征与固定判别准则完成目标甄别。平稳环境下的回波信号特征规整,干扰强度较低,算法可以稳定完成目标识别与判定。复杂电磁场景中,各类干扰会持续扭曲目标回波特征,弱化目标信号的可分辨性。环境状态的动态波动会持续改变信号背景基底,既定判别标准无法匹配实时变化的信号状态。算法对低信噪比、强干扰场景的适应能力不足,容易出现目标特征漏检、虚假目标误检的情况,抗环境扰动的综合能力存在明显不足。

2.3 信号参数估计算法的维度约束问题

传统信号参数估计算法多基于低维信号空间构建运算逻辑,侧重对单一维度信号信息的提取与计算。常规处理模式仅针对信号幅度、时延等基础参数开展估算工作,对多域耦合的复杂信号特征挖掘深度不足。复杂环境下的雷达信号呈现多维度、强耦合的分布特征,参数之间存在复杂的关联关系。低维运算框架无法覆盖多域信号的关联特征,参数估算过程会丢失大量有效信息。运算维度的局限性会降低参数估算的精准度,无法支撑复杂场景下高精度的信号处理需求。

2.4 多源信号分离算法的迭代机制弊端

传统多源信号分离算法采用固化的迭代逻辑完成混合信号拆解,迭代步长与收敛条件保持固定设置。简单场景中信号源数量有限、信号叠加形式单一,算法可以完成基础的信号分离工作。复杂环境会催生数量不定、特征各异的多源混合信号,信号叠加形式具备极强的随机性。固化的迭代机制无法适配动态变化的信号源结构,收敛速度难以匹配环境变化节奏。迭代运算容易陷入局部最优状态,无法彻底完成异构信号的有效拆分,大幅降低复杂场景下多源信号的分离质量。

3 面向复杂环境的雷达信号处理算法优化策略

3.1 自适应滤波算法的迭代机制优化

复杂电磁环境存在持续的干扰波动与信号畸变,固定模式的滤波运算很难适配动态变化的信号状态。常规滤波运算依赖固定迭代步长与收敛阈值,参数设置长期保持恒定,难以应对强弱交替、形态多变的环境干扰。迭代机制的优化可以围绕环境自适应调整思路展开,依托实时信号特征完成运算参数的动态调节。系统可根据信号噪声分布状态自主更新迭代节奏,干扰较弱的场景放缓迭代进程,保留更多微弱目标回波细节。干扰密集的场景收紧收敛范围,强化杂波抑制能力,削弱无序噪声对有效信号的掩盖作用^[3]。改良后的迭代模式能够摆脱静态运算框架的束缚,适配不同复杂度的电磁场景,平

衡降噪强度与信号保真度,提升复杂环境下滤波处理的稳定程度。

3.2 多维联合检测算法的结构层级优化

雷达回波在复杂场景中会出现特征扭曲、能量起伏与背景基底偏移,单一结构的检测框架难以捕捉完整的目标信息。多数传统检测方式仅依托信号能量维度完成判定,信息维度单一,对隐性目标特征的挖掘深度不足。结构层级优化可以重构算法整体架构,搭建分层递进的多维检测体系。新架构拆分特征提取、跨域融合与目标判别多个运算层级,分别挖掘时域波动、频域分布与空域位置的差异化特征。多维度信息经过逐层整合与筛选,形成更加完备的目标特征体系。层级化结构可以丰富检测判定的信息依据,弥补单维度检测的认知盲区,提升算法对低信噪比、强杂波场景的适应能力,减少特征紊乱引发的误判与漏判问题。

3.3 动态参数估计的运算逻辑优化

雷达信号在非平稳环境中呈现多域耦合、动态波动的特征,低维静态运算模式难以完成高精度参数解析。传统估计算法的运算逻辑相对固化,仅针对基础信号参数开展独立计算,忽略各类参数之间的内在关联。环境变化带来的信号畸变会持续干扰计算过程,造成参数估算精度下降。运算逻辑的优化可以突破传统低维计算局限,构建多维动态的参数解析体系。体系覆盖时延、幅度、相位、频率等核心信号要素,挖掘不同参数的关联规律。引入动态权重更新方式,根据信号畸变程度调整各维度计算权重,弱化异常信号对整体结果的干扰。全新运算逻辑能够深度挖掘有效信号信息,提升复杂场景下参数估算的精准性与稳定性。

3.4 多通道信号协同处理的流程优化

现代雷达系统多通道接收模式会产生大量异构信号数据,零散独立的处理流程不利于复杂信号的统一解析。传统处理模式各环节相对割裂,数据流转不够顺畅,难以应对多源信号叠加形成的复杂回波形态。流程优化可以整合零散运算环节,搭建一体化的链式处理架构。重构通道数据流转规则,打通不同接收通道的数据交互壁垒,实现信号数据的互通与复用。结合复杂信号的结构特征调整资源分配方式,合理调配运算资源应对不同难度的信号处理任务。规整连续的处理流程能够弱化传统运算机制的僵化问题,提升多源混合信号的拆解与整合质量,让雷达信号处理体系更好适配动态多变的复杂电磁场景。

4 复杂环境下雷达信号处理算法的创新研究

4.1 非平稳信号的智能拆解处理算法创新

复杂电磁场景下的雷达回波普遍具备时序无序、特征跳变的非平稳属性,常规拆解方式难以应对高频次的信号特征波动,对瞬时突变信号的解析能力存在明显不足。传统拆解算法依赖固定基函数完成信号分解,对非线性、无规律的信号分量适配性较低,容易出现分层拆解不彻底、突变特征丢失的问题。通过引入智能特征甄别机制,依托信号时序变化规律自主匹配拆解模型。针对非平稳信号频繁跳变的特点,细化信号拆解层级,将复杂回波拆分至十余组独立特征分量,区分有效目标分量与环境扰动分量^[4]。依托信号动态变化规律完成分层拆解阈值的持续优化,提升对短时突变、微弱起伏信号的捕捉能力。全新智能拆解模式摆脱固定模型约束,能够适配高动态、非平稳的复杂信号形态,完善非平稳雷达信号的精细化解析能力。

4.2 复合干扰的主动抑制算法创新

现阶段复杂电磁环境包含十余类有源、无源复合干扰形式,多层干扰叠加形成的混杂噪声基底,会大幅压缩有效信号的识别空间。传统抑制算法多为被动后置处理,仅能对单一干扰类型完成压制,无法应对多类型干扰叠加形成的复杂干扰场。通过重构主动抑制运行逻辑,前置干扰感知与特征辨识环节,提前捕捉干扰的频域分布、能量强度与持续周期特征。针对叠加度极高的混杂干扰,构建分层抑制模型,按照干扰能量梯度逐级完成净化处理。摒弃统一压制的处理模式,根据不同干扰的传播特性匹配差异化抑制策略,避免单一处理方式造成的信号损伤。主动式的干扰治理模式可以从源头削弱复合干扰的叠加效应,提升复杂强干扰场景下雷达信号的纯净度。

4.3 跨维度雷达信号融合处理算法创新

常规信号处理模式多局限于单域运算,仅能提取时域或频域单一维度的信号信息,对多域耦合的隐藏特征挖掘深度不足,极易造成关键信号信息的遗漏与缺失。复杂环境下的雷达信号特征分散在时域、频域、空域、极化域多个维度,单一维度的解析方式无法还原完整信号状态。依托多域融合思维搭建跨维融合处理框架,打破单域运算的边界限制。设计跨维度特征映射规则,实现多域信号特征的双向映射与互补融合。设置差异化特

征权重配比机制,根据环境复杂程度调整各维度信息的融合占比,强化高价值信号特征的保留力度。跨维度融合模式能够整合零散的信号特征信息,补齐单域处理的信息短板,构建更加完整、立体的雷达信号特征体系。

4.4 轻量化实时信号迭代处理算法创新

传统迭代算法运算层级冗余、算力消耗偏高,面对高频次、大数据量的雷达信号采样场景,运算延时会出现明显增长,无法满足实时处理需求。复杂动态场景对信号处理的时效性要求严苛,繁琐的运算结构会拖慢信号更新节奏,影响雷达系统的响应效率。轻量化创新思路聚焦运算结构精简与迭代逻辑简化,删减无效运算层级,重构核心迭代运算链路。优化迭代收敛逻辑,压缩无效迭代步骤,在保留核心信号特征的前提下降低整体运算开销。精简后的算法结构大幅减少资源占用比例,缩短信号迭代更新的运算时长。轻量化迭代模式可以适配高频采样的雷达工作场景,兼顾信号处理精度与实时运算效率,适配复杂动态环境下雷达信号的高速处理需求。

结束语

从信号特征规律梳理到传统算法短板剖析,再到处理体系的针对性优化与技术路径创新,整套方法体系围绕复杂环境下雷达信号处理的现实痛点逐层推进,可有效化解非平稳场景中信号畸变严重、复合干扰难以抑制的实际难题。相关思路能够为雷达信号处理技术的迭代升级提供清晰的落地参考,助力各类探测装备在复杂多变的应用场景中实现更稳定、更精准的信号解析效果。

参考文献

- [1]孙慧敏,王勇,雷刚,等.基于CPU与GPU的抗干扰雷达信号处理系统设计[J].火控雷达技术,2026,55(2):29-37,42.
- [2]赵兴海,严波,房崇鑫,等.面向分布式雷达信号处理的自适应负载均衡策略设计与实现[J].信息对抗技术,2026,5(1):63-74.
- [3]王沿皓,宇峰.高精度锁相技术在雷达信号处理中的应用与性能评估[J].中国宽带,2026,22(2):88-90.
- [4]薛健,刘伟平.现代雷达信号处理技术的研究进展及发展趋势[J].消费电子,2026(1):29-31.