

# 自适应旁瓣抑制算法在雷达高距离分辨率中的应用

李浩然 张栋栋

上海航天电子技术研究所 上海 201109

**摘要:** 高距离分辨率雷达因宽带信号特性, 易受旁瓣干扰, 导致目标检测遗漏与虚警。自适应旁瓣抑制算法通过动态优化权值, 显著降低旁瓣电平(如稀疏约束算法达-62dB), 提升弱目标检测能力与抗干扰性能。仿真与实测表明, 该算法在复杂多目标、低信噪比及密集杂波环境中, 较传统方法可提升检测概率超25%, 且鲁棒性强, 工程化成本可控, 对提升雷达在无人机监测、舰船探测等场景的实战效能具有重要意义。

**关键词:** 自适应旁瓣抑制算法; 雷达高距离分辨率; 应用

**引言:** 高距离分辨率雷达作为现代探测系统的关键装备, 凭借宽带信号特性实现了米级甚至亚米级距离分辨能力, 在无人机侦察、精确制导等领域应用广泛。然而, 其信号处理中矩形窗函数导致的旁瓣能量泄露问题突出, 易引发强目标旁瓣掩盖弱目标、密集杂波虚警及敌方距离欺骗干扰等风险。传统时域加权与频域滤波方法难以兼顾旁瓣抑制与主瓣保真度, 而自适应旁瓣抑制算法通过动态优化权值, 可显著提升复杂环境下的目标检测性能, 成为高分辨率雷达抗干扰技术的核心发展方向。

## 1 高距离分辨率雷达信号模型与旁瓣特性分析

### 1.1 高距离分辨率雷达信号模型

(1) 宽带信号形式中, 线性调频信号(LFM)通过频率随时间线性变化实现大时宽-带宽积, 表达式为  $s(t) = A \exp[j(2\pi f_0 t + \pi K t^2)]$  ( $A$ 为幅度,  $f_0$ 为载频,  $K$ 为调频率), 具有抗干扰能力强的优势; 步进频信号(SFR)通过离散频率跳变合成宽带信号, 单个脉冲带宽窄, 可降低发射机峰值功率要求, 适合工程实现。(2) 距离分辨率 $\Delta R$ 与信号带宽 $B$ 成反比, 满足 $\Delta R = c/(2B)$  ( $c$ 为光速), 即带宽越大, 分辨率越高, 例如带宽从10MHz提升至100MHz时, 分辨率从15m提高到1.5m。

### 1.2 旁瓣产生机理

(1) 矩形窗函数时域为矩形脉冲, 频域为sinc函数, 其旁瓣幅度高(第一旁瓣比主瓣低约13.2dB), 且旁瓣衰减慢, 导致信号频谱扩散, 引发旁瓣干扰。(2) 距离旁瓣泄露(RSL)数学表达为  $RSL = 20 \lg \frac{|\text{sinc}(n\Delta f T)|}{\max(|\text{sinc}(n\Delta f T)|)}$  ( $n$ 为旁瓣阶数,  $\Delta f$ 为频率间隔,  $T$ 为脉冲宽度), 反映旁瓣能量对主瓣信号的影响程度<sup>[1]</sup>。

### 1.3 旁瓣干扰场景分析

(1) 多目标场景下, 强目标旁瓣能量会掩盖邻近弱目标, 如近距离强反射目标的旁瓣可能使1km外小目标信号被淹没, 导致目标检测遗漏。(2) 密集杂波环境中,

旁瓣接收的杂波信号易超过检测门限, 引发虚警, 例如在城市环境中, 建筑杂波经旁瓣接收后, 虚警率可提升30%以上。(3) 敌方通过发射模拟雷达信号的距离欺骗干扰, 利用旁瓣进入雷达接收系统, 伪造多个虚假目标, 扰乱雷达对真实目标的跟踪与识别。

## 2 自适应旁瓣抑制算法原理与设计

### 2.1 传统旁瓣抑制方法回顾

(1) 时域加权通过调整脉冲信号幅度分布降低旁瓣, 泰勒窗可在指定旁瓣电平下优化主瓣宽度, 如设定旁瓣电平-40dB时, 主瓣展宽系数约1.5; 切比雪夫窗能实现等幅旁瓣, 通过调节窗参数可将旁瓣统一控制在目标电平, 但主瓣宽度随旁瓣降低而增加, 适用于对旁瓣一致性要求高的场景。(2) 频域滤波通过修改信号频谱抑制旁瓣, 零陷插入在杂波或干扰对应的频点设置幅度零点, 如针对500Hz干扰信号, 在该频点构建深度-60dB的零陷; 多普勒补偿则通过校正目标运动引发的频率偏移, 减少因多普勒扩展导致的旁瓣能量扩散, 提升滤波稳定性。

### 2.2 自适应算法核心思想

(1) 基于协方差矩阵的统计优化以样本协方差矩阵描述接收信号统计特性, SMI算法通过计算协方差矩阵逆矩阵获取最优权值, 公式为  $w = R^{-1} s_0$  ( $R$ 为协方差矩阵,  $s_0$ 为期望信号导向矢量), 可动态适应信号环境变化。(2) 最小均方误差(MMSE)准则下, 权值计算以接收信号与期望信号的均方误差最小为目标, 推导得  $w_{MMSE} = R^{-1} p$  ( $p$ 为接收信号与期望信号的互相关矢量), 能在抑制旁瓣的同时保留主瓣信号完整性<sup>[2]</sup>。

### 2.3 改进型自适应算法设计

(1) 快速收敛算法中, 对角加载在协方差矩阵对角线添加小值, 避免矩阵奇异, 加快收敛速度, 加载量通常取矩阵迹的0.1%-1%; 降维处理通过子空间分解减少计算维度, 如利用主成分分析(PCA)保留95%信号能量

的子空间, 计算量降低60%以上。(2) 稀疏约束优化利用目标距离像的稀疏特性, 通过L1正则化约束权值稀疏性, 公式为 $\frac{\min}{w} \|x_2^T W w\| + \lambda \|w\|_1$  ( $\lambda$ 为正则化参数), 提升弱目标旁瓣抑制效果。(3) 深度学习辅助算法采用CNN识别旁瓣模式, 通过训练集(含10万组雷达回波-旁瓣标签数据)学习旁瓣特征, 抑制精度比传统算法提升25%, 且对复杂干扰的适应性更强。

#### 2.4 算法性能指标

(1) 旁瓣电平(PSLL)反映最大旁瓣与主瓣的功率比, 优秀算法可将PSLL控制在-50dB以下, 如改进型SMI算法PSLL达-58dB。(2) 积分旁瓣比(ISLR)衡量旁瓣总能量与主瓣能量的比值, 自适应算法通常将ISLR控制在-30dB以下, 稀疏约束算法ISLR可低至-35dB。(3) 计算复杂度与实时性分析中, 传统SMI算法复杂度为 $O(N^3)$  ( $N$ 为阵元数), 降维处理后复杂度降至 $O(N^2)$ , 满足雷达实时处理(要求10ms内完成一次运算)的需求, 而深度学习算法因需GPU加速, 实时性稍弱, 但在离线处理场景中优势显著。

### 3 算法仿真与性能验证

#### 3.1 仿真环境搭建

(1) 雷达参数设置需贴合高距离分辨率场景, 带宽设为100MHz(对应距离分辨率1.5m), 脉冲宽度取10 $\mu$ s(平衡测距精度与能量), 采样率设为200MHz(满足奈奎斯特采样定理, 避免频谱混叠); 载频固定为X波段(10GHz), 天线增益30dB, 确保信号覆盖范围与接收灵敏度匹配。(2) 目标模型包含两类: 点目标模拟小型目标(如无人机), 散射系数设为5m<sup>2</sup>, 运动速度50m/s(模拟低空飞行状态); 扩展目标模拟大型目标(如舰船), 沿距离向分布5个散射点, 间距2m, 散射系数分别为8m<sup>2</sup>、6m<sup>2</sup>、5m<sup>2</sup>、6m<sup>2</sup>、8m<sup>2</sup>, 还原目标实际散射特性。(3) 干扰模型涵盖三种典型场景: 高斯白噪声干扰功率谱密度为-120dBm/Hz, 模拟自然电磁噪声; 部分带干扰带宽20MHz(覆盖雷达信号20%带宽), 干扰功率比信号高10dB, 模拟窄带人为干扰; 密集多径干扰设置3条多径分量, 时延分别为0.5 $\mu$ s、1 $\mu$ s、1.5 $\mu$ s, 幅度为直射信号的0.6倍、0.4倍、0.2倍, 模拟复杂地形(如城市、山地)的多径效应<sup>[1]</sup>。

#### 3.2 对比实验设计

(1) 传统加权方法vs.自适应算法对比中, 传统方法选取泰勒窗(旁瓣电平-40dB)、切比雪夫窗(旁瓣电平-50dB), 自适应算法选取SMI算法、稀疏约束算法, 以旁瓣电平(PSLL)、积分旁瓣比(ISLR)为核心指标, 每组实验重复50次取均值, 消除随机误差。(2) 不同信噪

比(SNR)下的性能对比设置SNR区间为-10dB~20dB, 步长5dB, 在每种SNR下分别测试各算法的目标检测概率(设定虚警率为10<sup>-6</sup>), 分析算法在低信噪比环境下的抗干扰能力边界。(3) 多目标场景下的目标分辨率验证设置3个点目标, 间距分别为1.5m(等于距离分辨率)、2m、3m, 在高斯白噪声干扰(SNR=5dB)下, 测试各算法对相邻目标的分辨能力, 以目标距离像中峰值分离度(大于3dB视为可分辨)为评价标准<sup>[4]</sup>。

#### 3.3 仿真结果分析

(1) 距离像对比显示, 传统泰勒窗PSLL约-38dB, 切比雪夫窗约-48dB; SMI算法PSLL降至-55dB, 稀疏约束算法进一步降至-62dB, 旁瓣电平降低效果显著, 且稀疏约束算法能有效抑制扩展目标边缘的旁瓣泄露, 距离像细节更清晰。(2) 接收机操作特性(ROC曲线)表明, 在SNR=0dB时, SMI算法检测概率达90%(虚警率10<sup>-6</sup>), 传统切比雪夫窗仅为72%; 当SNR降至-5dB, 稀疏约束算法检测概率仍保持81%, 展现出更优的低信噪比适应性; ROC曲线下面积(AUC)排序为: 稀疏约束算法(0.98) > SMI算法(0.95) > 切比雪夫窗(0.88) > 泰勒窗(0.82)。(3) 鲁棒性分析中, 当协方差矩阵估计误差从5%增至20%时, SMI算法PSLL升高8dB, 稀疏约束算法仅升高3dB, 表明稀疏约束通过L1正则化增强了对矩阵估计误差的容忍度; 而传统加权方法因参数固定, PSLL基本不变, 但在误差超过10%时, 目标检测概率下降幅度达15%, 鲁棒性弱于自适应算法。

### 4 实测数据验证与工程应用分析

#### 4.1 实测平台介绍

(1) 雷达系统采用X波段宽带相控阵雷达, 核心参数与仿真环境保持一致: 带宽100MHz(距离分辨率1.5m), 脉冲宽度10 $\mu$ s, 采样率200MHz, 载频10GHz; 天线阵面含64个收发通道, 峰值发射功率8kW, 天线增益32dB, 方位扫描范围-60°~60°, 俯仰扫描范围0°~30°, 具备实时信号处理与数据存储功能, 支持多模式(搜索、跟踪)切换。(2) 数据采集涵盖外场试验与暗室测试两类场景: 外场试验选取城郊开阔地带(无高大建筑遮挡)与山地复杂地形(含植被、岩石杂波), 分别采集无人机(点目标, 飞行速度50m/s)、小型舰船模型(扩展目标, 长10m)的回波数据, 同步记录环境噪声与地形杂波; 暗室测试在微波暗室(静区尺寸5m×5m×8m, 背景噪声≤-140dBm/Hz)内, 通过转台模拟目标运动, 排除外界干扰, 获取纯净目标回波, 用于算法基础性能校准。

#### 4.2 实测数据处理流程

(1) 数据预处理分为两步: 脉冲压缩采用匹配滤波

算法,对原始回波信号与LFM信号模板进行卷积运算,压缩脉冲宽度以提升距离分辨率,处理后脉冲宽度从10 $\mu$ s降至10ns;运动补偿通过提取目标回波的多普勒频移(基于FFT频谱分析),计算目标径向速度,对信号进行相位校正,消除因目标运动导致的距离像偏移,补偿精度控制在0.1m以内。(2)自适应算法嵌入基于FPGA+DSP硬件平台实现:FPGA负责信号预处理(AD采样、脉冲压缩)与实时数据缓存,处理时延 $\leq$ 5ms;DSP加载SMI算法与稀疏约束算法,通过优化权值计算模块(采用定点运算替代浮点运算,精度损失 $\leq$ 0.5dB),实现算法实时运行,单次权值更新时间 $\leq$ 2ms,满足雷达10Hz的信号处理帧率要求;算法参数可通过上位机动态调整,支持现场调试与性能优化<sup>[5]</sup>。

#### 4.3 实测结果分析

(1)旁瓣抑制效果方面,外场实测中泰勒窗PSLL为-36dB(仿真-38dB)、切比雪夫窗-46dB(仿真-48dB),SMI算法-53dB(仿真-55dB),稀疏约束算法-60dB(仿真-62dB),实测与仿真结果偏差 $\leq$ 2dB,主要因外场环境存在轻微杂波干扰;暗室纯净环境下,稀疏约束算法PSLL达-61dB,与仿真值基本一致,验证算法旁瓣抑制效果稳定。(2)实际干扰环境适应性测试中,山地复杂地形杂波功率比城郊环境高15dB,传统切比雪夫窗目标检测概率从85%降至62%,而稀疏约束算法仅从96%降至88%,表明其对地形杂波的抑制能力更优;面对突发窄带干扰(外场模拟部分带干扰,功率比信号高10dB),SMI算法与稀疏约束算法检测概率保持在85%以上,传统方法则降至55%,凸显自适应算法的抗干扰优势。(3)工程

化可行性评估显示,算法运行占用FPGA逻辑资源约35%(64通道场景),DSP运算负荷 $\leq$ 60%,单通道功耗约1.2W(整机功耗 $\leq$ 80W),满足车载、舰载雷达的轻量化与低功耗要求;硬件成本与传统信号处理模块相比增加约20%,但旁瓣抑制性能提升显著,综合性价比优势明显,具备批量工程应用潜力。

#### 结束语

自适应旁瓣抑制算法通过动态优化信号权值,有效解决了高距离分辨率雷达中旁瓣干扰导致的目标漏检与虚警问题,在复杂多目标、低信噪比及密集杂波场景下展现出显著优势。仿真与实测结果表明,其旁瓣抑制能力较传统方法提升超20dB,且工程化成本可控、实时性满足需求。未来,随着深度学习与稀疏优化技术的融合,算法将进一步增强对非线性干扰的适应性,为高分辨率雷达在智能探测领域的应用提供更强技术支撑。

#### 参考文献

- [1]张亮,陈彦来.一种高距离分辨率低截获概率的雷达信号分析[J].舰船电子对抗,2020,42(01):68-70.
- [2]张瑞.降维空时自适应处理研究[J].电子与信息学报,2021,23(3):261-262.
- [3]王铮.智能天线波束形成与零点技术的新方法—子阵法[J].电子工程,2021,5(4):28-30.
- [4]刘生.副瓣对消系统性能改进方法[J].现代雷达,2021,25(12):59-60.
- [5]李春.相控阵雷达发射波束自适应零点形成方法研究[J].现代雷达,2021,21(2):49-50.