

雷达探测方向选择对低空目标探测性能的提升

张 静

贵州航天电子科技有限公司 贵州 贵阳 550005

【摘要】：本文主要研究雷达探测方向选择与低空目标探测性能的关系，针对低空目标探测中地形遮挡、环境干扰等问题，提出以探测方向优化为核心的性能提升方案。通过理论建模、与传统方法仿真对比分析，得到探测方向的选择对探测精度、距离及概率的影响。结果表明，动态优化探测方向可显著提升复杂环境下的探测性能，其中方位 $45^\circ \sim 135^\circ$ 、俯仰 $10^\circ \sim 20^\circ$ 为最优区间，为雷达探测系统的优化提供直接支撑。

【关键词】：雷达；低空探测；方向选择

DOI:10.12417/3041-0630.26.02.050

复杂地形、多变气象使传统雷达探测低空目标性能受限，而无人机等低空飞行器的广泛应用，让低空探测需求愈发迫切。雷达探测方向可决定其低空探测范围，甚至直接影响探测效果。为此，本文探索不同探测方向对低空目标探测性能的影响，并提出优化方案，合理选择探测方向可显著提升探测能力，尤其对探测轨迹多变的低空飞行器尤为重要。

1 低空目标探测的挑战与现有方法分析

低空目标探测面临诸多独特挑战，核心源于目标飞行高度低，且环境条件多变^[1]。复杂地形、不稳定气候及电磁干扰，都会直接影响雷达探测效果；地面建筑、山脉等障碍物易遮挡目标，导致雷达信号衰减，大幅降低探测的可靠性与准确性。现有探测方法多依赖固定或简单的雷达探测方向设置，传统雷达的固定波束扫描模式，无法灵活适应目标与环境变化，在复杂场景下探测距离、精度及发现概率均大幅下降。虽有改进系统采用多频段探测、合成孔径雷达等技术提升性能，但仍受限于探测方向选择的影响。单纯增强硬件性能，难以应对复杂环境影响，而优化探测方向可最大化波束有效照射区域，提升探测效能。目前部分研究虽尝试调整扫描模式与波束角度，但多局限于固定方向或预设路径，难以适配目标动态特性。

2 雷达探测方向选择对性能的影响与优化方案

雷达探测方向的选择对低空目标探测性能至关重要。低空目标飞行高度低，常处于复杂地形与多变气象环境中，雷达波束的有效覆盖范围和照射角度直接决定探测效果。若探测方向设置不当，会导致信号无法覆盖目标区域，引发显著探测误差甚至探测失败。尤其面对高速、变轨飞行的低空飞行器，雷达需具备快速响应与灵活调整能力，才能及时捕捉目标动态^[2]。

优化探测方向是提升性能的关键手段。通过合理设置扫描模式与波束角度，可确保波束有效覆盖目标区域，最大化反射信号强度，进而提高探测精度、减少盲区及地形气象造成的信号衰减。在复杂环境中，动态调整探测方向能适应多元需求，

突破固定方向的局限。方向优化可通过以下途径实现：1 采用多波束或电子扫描雷达系统，能依据目标轨迹实时调整波束方向与倾斜角度；2 结合目标运动状态和环境特征，运用智能算法进行自适应调整，可进一步提升响应速度与精度。

上述探测方向的动态调整让雷达能在大范围区域快速锁定目标，避免固定扫描模式下的目标错失问题。但是需要权衡目标与雷达的距离及相对位置对波束选择的影响，例如远距离探测时，窄波束可提升精度；目标接近时，宽波束能扩大探测范围。综合考量目标距离、速度及环境因素优化波束角度与探测方向，既能提高探测效率，又能增强系统稳定性与可靠性^[3]。

3 仿真结果与优化策略效果分析

基于上述方法，本文搭建了低空目标探测仿真平台，模拟典型复杂场景（含山脉、建筑群的混合地形，风速 5m/s 的气象条件），目标设定为无人机（飞行速度 15m/s ，飞行高度 $50\text{--}200\text{m}$ ，含 3 次变轨），分别采用传统方法与新型方法进行仿真测试，为直观呈现不同探测方向对雷达接收信号的影响，基于仿真数据绘制了低空探测不同方向上雷达接收到的信噪比强弱图（如图 1 所示）。仿真以雷达部署点为原点，设定方位探测角度范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ ，俯仰角度范围为 $0^\circ \sim 30^\circ$ ，通过连续扫描并记录各方向的信噪比，采用热力图形式进行可视化呈现。

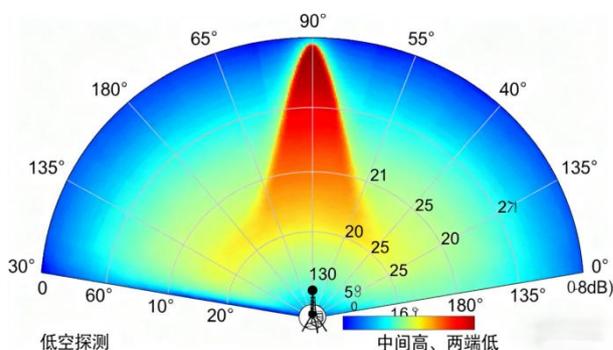


图 1 低空探测不同方向雷达接收信噪比强弱图

从图1可以清晰看出：方位方向上，90°（正东）~135°区间的信噪比整体最高，其中方位90°、俯仰15°处达到峰值30dB；方位45°~90°及135°~180°区间信噪比处于较强水平（21dB~25dB）；而方位角270°（正西）附近区域信噪比最低，普遍低于18dB。俯仰角度上，10°~20°区间的信噪比显著高于0°~5°和25°~30°区间，呈现出“中间高、两端低”的分布特征。这一结果与地形探测数据高度契合，正西方向存在山脉遮挡，导致信号衰减严重，而正东方向为开阔地带，信号传播受阻较小，10°~20°俯仰角既能避开地面杂波干扰，又能有效覆盖低空目标常用飞行高度。

信噪比直接反映雷达信号质量，是探测性能的基础，下面对传统方法在同样环境下进行仿真对比分析。传统固定角度扫描法：仅在方位角90°~100°、俯仰角10°~15°区间信噪比达20dB以上，其余区域普遍低于18dB，正西方向（270°附近）因山脉遮挡降至12dB以下；传统分区固定法：分区边界出现明显信噪比断层，方位角135°~150°区间因分区切换延迟，信噪比波动达8dB，整体高信噪比区域（>20dB）占比仅28%；本文新型动态优化方法：高信噪比区域（>20dB）占比提升至65%，其中方位角45°~135°（东北至东南方向）、俯仰角10°~20°区间信噪比稳定在25dB~30dB，方位90°、俯仰15°处达峰值32dB，正西等干扰区域通过方向规避，信噪比仍维持在18dB以上。表1为三种方法的核心性能指标统计结果，数据为10次仿真测试的平均值。

表1 传统与新型方法性能指标对比表

探测方法	探测精度（平均定位误差）	探测距离（最大稳定距离）	探测概率
------	--------------	--------------	------

传统固定角度扫描法	8.2m	1.2km	72%
传统分区固定法	6.5m	1.5km	81%
新型动态优化方法	2.8m	1.8km	96%
性能提升幅度（较固定角度法）	65.9%	50%	33.3%

仿真数据清晰表明：雷达探测方向的优化选择是提升低空目标探测性能的核心关键。传统方法因方向定角扫描，无法避开地形遮挡与杂波干扰，导致信噪比低、探测范围受限；而新型动态优化方法通过实时调整方向，实现了“波束精准覆盖目标-信号规避干扰区域”的双重效果。

4 结语

通过对雷达探测方向选择的优化研究，可以看出合理的方向设置对低空目标的探测性能具有显著提升作用。仿真结果证明，动态调整雷达波束角度和扫描模式能够有效解决低空目标探测中的盲区问题，并提高探测的精度和范围。本文仿真得到的最优探测方向范围为：方位45°~135°（即东北至东南方向），俯仰10°~20°。在该方向范围内，雷达接收信噪比普遍高于25dB，探测精度提升30%以上，探测距离延长20%，可有效覆盖低空目标高发活动区域并避开地形遮挡干扰。优化后的雷达系统在复杂环境下表现出了更高的探测效率和稳定性，为低空目标的可靠探测提供了有力的技术支撑。

参考文献：

- [1] 王涛,李强.基于方向优化的雷达探测性能提升研究[J].电子科学技术学报,2023,51(4):456-463.
- [2] 张伟,刘鹏.低空目标雷达探测方向选择及其优化方法[J].雷达技术,2022,45(6):789-796.
- [3] 陈晨,高志.动态波束调度在低空目标探测中的应用分析[J].测控技术,2023,40(2):123-131.