

雷达接收机动态范围与弱小目标检测性能关系研究

霍贝祺

江南机电设计研究所 贵州 贵阳 550009

【摘要】：针对复杂电磁环境下雷达弱小目标检测难度大的问题，本文深入研究雷达接收机动态范围与弱小目标检测性能的内在关联。通过分析接收机动态范围的核心影响因素，建立包含动态范围参数的弱小目标检测模型，结合仿真实验与实测数据验证动态范围对检测性能的量化影响。结果表明，接收机动态范围不足会导致弱小目标信号被强杂波或干扰淹没，合理提升动态范围可显著改善检测概率、降低虚警率。研究成果为雷达接收机设计优化及弱小目标检测算法改进提供理论支撑与技术参考。

【关键词】：雷达接收机；动态范围；弱小目标检测；检测概率；虚警率

DOI:10.12417/3041-0630.26.03.030

1 引言

现代雷达系统面临的电磁环境日趋复杂，除了目标反射信号外，还充斥着杂波地面杂波海面杂波气象杂波以及人为干扰压制性干扰欺骗性干扰等。对于截面积小反射能量弱的弱小目标而言，其回波信号往往被强杂波和干扰信号掩盖，导致检测难度极大。雷达接收机作为信号接收与预处理的核心部件，其性能直接决定后续信号处理的效果，其中动态范围是衡量接收机性能的关键指标之一。动态范围反映接收机同时处理强弱信号的能力，即接收机能够正常接收的最强信号与最弱信号的比值。现有研究多聚焦于弱小目标检测算法的优化，而对接收机硬件性能尤其是动态范围对检测性能的基础影响研究不够深入。部分雷达系统因接收机动态范围设计不合理，即便采用先进的检测算法，也难以有效提取弱小目标信号。因此，系统研究雷达接收机动态范围与弱小目标检测性能的关系，明确动态范围的优化方向，对提升雷达系统整体检测性能具有重要现实意义。

2 雷达接收机动态范围核心理论

2.1 动态范围定义与表征

雷达接收机动态范围通常定义为在保证输出信号失真度不超过允许阈值的前提下，接收机能够接收的最大输入信号功率与最小可检测输入信号功率的比值，常用分贝数表示。其数学表达式为 $DR=10\lg P_{max}/P_{min}$ ，其中 DR 为动态范围， P_{max} 为最大允许输入信号功率， P_{min} 为最小可检测输入信号功率。

最小可检测信号功率由接收机噪声系数决定，遵循热噪声极限公式 $P_{min}=kTB10NF/10$ ，其中 k 为玻尔兹曼常数， T 为绝对温度， B 为接收机带宽， NF 为噪声系数。最大允许输入信号功率则受限于接收机非线性失真，当输入信号功率超过临界值时，接收机放大器部件会进入非线性区域，导致信号失真，产生谐波和互调产物，干扰有用信号的正常接收。

2.2 动态范围影响因素

接收机动态范围主要受噪声系数非线性失真和增益控制精度三大因素影响。噪声系数直接决定最小可检测信号功率，噪声系数越小， P_{min} 越低，动态范围下限越优；非线性失真决定最大允许输入信号功率，放大器线性度越好， P_{max} 越大，动态范围上限越高；自动增益控制电路的控制精度影响接收机对信号幅度的调节能力，精准的增益控制可在一定程度上扩展动态范围，避免强信号饱和和失真同时保证弱信号有效放大。此外，接收机带宽信号频率以及外部电磁干扰等也会间接影响动态范围。宽带宽虽能提升信号捕获能力，但会引入更多噪声，降低最小可检测信号性能；高频信号传输过程中损耗较大，可能导致实际输入信号幅度降低，影响动态范围的有效利用。

3 动态范围与弱小目标检测性能关联机制

3.1 弱小目标检测核心原理

弱小目标的核心特征是回波信号幅度低信噪比差，其检测过程本质上是从强杂波和干扰背景中提取微弱有用信号的过程。雷达系统通过发射电磁波，接收目标反射的回波信号，经过滤波放大解调等处理后，采用恒虚警率检测等算法判断目标是否存在。检测性能主要通过检测概率和虚警率两个指标表征，检测概率是指存在目标时系统正确检测到目标的概率，虚警率是指不存在目标时系统误判为存在目标的概率。当信噪比高于检测阈值时，检测概率显著提升；反之，当信噪比低于阈值时，检测概率急剧下降。弱小目标回波信号本身信噪比极低，若接收机动态范围不足，强杂波或干扰信号会导致接收机饱和和失真，进一步恶化目标信号的信噪比，甚至使目标信号完全被掩盖，严重影响检测性能。

3.2 动态范围对检测性能的影响机制

动态范围不足对弱小目标检测的负面影响主要体现在两个方面。一方面，强杂波或干扰信号进入接收机后，若其幅度超过接收机最大允许输入功率，会导致接收机放大器饱和，产

生非线性失真。失真信号会覆盖弱小目标的微弱回波，使后续信号处理电路无法有效区分有用信号与失真产物，直接降低检测概率。另一方面，为了避免强信号饱和，若过度降低接收机增益，会导致弱小目标信号放大不足，输出信号幅度低于检测阈值，同样无法被有效检测。合理提升接收机动态范围可有效缓解上述问题。足够大的动态范围能够保证强杂波和干扰信号输入时接收机仍工作在线性区域，避免信号失真；同时，无需过度降低增益即可实现弱信号的有效放大，确保目标信号经过处理后信噪比满足检测要求，从而提升检测概率，降低虚警率。

4 实验验证与结果分析

4.1 实验设计

为量化分析接收机动态范围与弱小目标检测性能的关系，设计仿真实验与实测实验相结合的验证方案。仿真实验基于MATLAB平台搭建雷达信号处理系统，设置目标截面积为0.01平方米模拟弱小目标，杂波采用瑞利分布模拟地面杂波，干扰为窄带压制性干扰。接收机参数设置如下：带宽1MHz，噪声系数5dB，增益可调，动态范围通过调整放大器线性度实现分级控制，分别设置为60dB70dB80dB90dB四个梯度。实测实验采用某型雷达接收机原型机，通过信号源模拟弱小目标回波强杂波和干扰信号，输入接收机后，记录不同动态范围下的输出信号，采用恒虚警率检测算法计算检测概率和虚警率。实验中保持其他参数不变，仅改变接收机动态范围，对比分析检测性能指标的变化规律。

4.2 实验结果与分析

仿真实验与实测实验结果趋势一致，核心数据如下表所示。由表中数据可知，当动态范围从60dB提升至90dB时，检测概率呈现显著上升趋势，虚警率呈现明显下降趋势。当动态范围为60dB时，强杂波导致接收机部分饱和和失真，弱小目标信号被掩盖，检测概率仅为32%，虚警率高达18%；当动态

范围提升至70dB时，饱和失真得到缓解，检测概率提升至58%，虚警率降至11%；当动态范围达到80dB时，接收机工作在线性区域，检测概率提升至89%，虚警率降至3%；当动态范围进一步提升至90dB时，检测概率略升至92%，虚警率降至2%，性能提升幅度趋于平缓。

表1 不同动态范围下检测性能指标

| 动态范围 dB | 检测概率% | 虚警率% |
|---------|-------|------|
| 60 | 32 | 18 |
| 70 | 58 | 11 |
| 80 | 89 | 3 |
| 90 | 92 | 2 |

实验结果表明，动态范围是影响弱小目标检测性能的关键因素，提升动态范围可显著改善检测性能，但当动态范围达到一定阈值后，性能提升边际效应明显。结合工程实际，综合考虑成本与性能，雷达接收机动态范围设计为80dB左右可实现性价比最优。

5 结论与展望

本文通过理论分析与实验验证，明确了雷达接收机动态范围与弱小目标检测性能的内在关联。研究表明，接收机动态范围不足会导致强杂波或干扰信号引发饱和和失真，掩盖弱小目标信号，降低检测概率并升高虚警率；合理提升动态范围可确保接收机工作在线性区域，有效放大弱小目标信号，显著提升检测性能。实验数据显示，动态范围从60dB提升至80dB时，检测概率从32%提升至89%，虚警率从18%降至3%，性能改善效果显著。

参考文献：

- [1] 魏鋈宇,陈泽宗,赵晨,等.S波段船载测波雷达接收机设计及实现[J].科学技术与工程,2021,21(17):7174-7179.
- [2] 杨新宇.雷达接收机的动态范围探究[J].中国新通信,2019,21(03):51.
- [3] 张福贵,何建新.新型天气雷达接收机动态范围测试集成系统[J].现代电子技术,2018,41(18):80-83.