

天气雷达探测效能评估模型构建研究

李国虎¹ 谢贵生² 文智¹

1. 四川省凉山州木里县气象局, 中国·四川 凉山州 615899

2. 四川省凉山州气象局, 中国·四川 凉山州 615000

摘要: 天气雷达在天气预报与灾害预警中至关重要, 但其探测效能受复杂天气、地形差异及设备性能等因素影响。本研究构建了综合考虑天气条件、地形干扰和设备参数的评估模型, 提出涵盖探测精度、覆盖范围、时间分辨率与可靠性的指标体系, 并采用数据预处理、特征提取与机器学习算法提升模型预测能力。创新性地引入动态更新机制, 使模型能根据实时数据优化参数, 增强适应性。通过实验验证与优化, 模型可有效评估天气雷达性能, 提升预报准确性, 降低灾害损失, 对气象预报、设备研发及科研具有重要应用价值。

关键词: 天气雷达; 模型; 气象监测; 天气

Research on Building a Model for Evaluating the Detection Performance of Weather Radar

Li Guohu¹, Xie Guisheng², Wen Zhi¹

1. Muli County Meteorological Bureau, Liangshan Yi Autonomous Prefecture, Sichuan Province, China Sichuan Liangshan Prefecture 615899

2. Liangshan Yi Autonomous Prefecture Meteorological Bureau, Sichuan Province, China Sichuan Liangshan Prefecture 615000

Abstract: Weather radar plays a pivotal role in weather forecasting and disaster early warning. However, its detection performance is significantly influenced by complex meteorological conditions, topographic variations, and equipment capabilities. This study develops a comprehensive evaluation model that jointly accounts for atmospheric conditions, terrain-induced interference, and radar system parameters. A multi-dimensional performance metric system is proposed—covering detection accuracy, spatial coverage, temporal resolution, and operational reliability. To enhance predictive capability, the model integrates robust data preprocessing, advanced feature extraction techniques, and state-of-the-art machine learning algorithms. Notably, a dynamic updating mechanism is innovatively incorporated, enabling the model to continuously refine its parameters using real-time observational data and thereby improving adaptability. Experimental validation and iterative optimization confirm that the model effectively assesses radar performance, enhances forecast precision, mitigates disaster-related losses, and holds substantial practical value for operational meteorology, radar system development, and atmospheric research.

Keywords: Weather radar; Model; Meteorological monitoring; Weather

0 引言

天气雷达在气象监测、预报和科研中具有重要作用, 可实时获取降水、风场等信息, 提升灾害预警与数值预报精度, 并支持大气物理研究。国内外技术发展迅速, 美欧在天气雷达网络与评估模型方面较为成熟, 中国也建成覆盖全国的天气雷达网并发展多源数据融合评估方法。然而, 天气雷达探测效能仍受天气、地形、设备等因素影响, 强降雨导致信号衰减, 复杂地形引发杂波干扰, 现有评估指标多聚焦精度与覆盖范围, 对可靠性、时间分辨率考虑不足, 且方法单一、通用性差, 难以适应不同区域与条件。

为此, 本研究旨在构建科学、全面、通用的天气雷达探测效能评估模型, 建立涵盖精度、覆盖、时效、可靠性等多维度的指标体系, 发展融合天气雷达、卫星与地面观测的多源数据评估方法, 提升模型适应性与准确性, 并通过实际数据实验验证优化, 实现对不同环境下降雨天气雷达性能的精准评估。

1 天气雷达探测原理

1.1 工作机制

天气雷达通过发射电磁波并接收云中水滴、冰晶等目标散射的回波, 探测天气状况。以脉冲多普勒天气雷达为

例,其周期性发射脉冲并在间隙接收回波,利用时间差和电磁波速(约 3×10^8 m/s),按 $R=ct/2$ 计算目标距离。同时,依据多普勒效应,通过分析回波频率偏移获取目标径向速度,进而判断台风等天气系统的旋转方向与强度,实现对天气现象的精细化监测。

1.2 回波信号

回波强度与目标大小、数量及散射特性相关,强降雨回波强于轻雾;多普勒频移反映径向速度,频谱宽度体现速度一致性,湍流致谱宽增大;相位信息用于分析运动轨迹,多基地天气雷达利用相位差精确测定目标三维位置,协同追踪风暴路径。

1.3 数据获取

天气雷达数据获取需对接收回波信号进行放大、滤波等预处理,并通过模数转换为数字信号。采样频率应高于信号最高频率两倍,如 10kHz 信号需至少 20kHz 采样,采样点数影响分辨率与精度。为全面获取气象信息,天气雷达采用多角度、多频率扫描:不同角度探测区域差异,构建三维结构,垂直扫描分析云层高度与厚度;多频率利用电磁波对雨滴、冰晶的不同散射特性提升识别能力。采集数据存入数据库,用于气象预报与气候研究,如分析长期降水变化,助力水资源管理与农业生产。

2 影响因素分析

2.1 天气条件

天气条件显著影响天气雷达探测效能,降水中的雨滴、雪花等粒子导致天气雷达波散射与吸收,信号衰减可达 10-20dB,干扰降水强度与范围判断;云雾中水汽凝结物降低探测精度,浓雾或低云妨碍对远距离及低空目标的探测;强风引发大气不稳定,加速云层移动与形变,增加跟踪难度,尤其在台风等极端天气中需频繁调整探测策略。

2.2 地形干扰

地形显著影响天气雷达探测效能:山脉阻挡导致盲区,高大山体背后可形成数十公里探测空白;城市建筑引发杂波,干扰降水识别;水体镜面反射增强回波,掩盖真实目标。各类地形均制约天气雷达探测范围与精度^[1]。

2.3 设备性能

设备性能直接影响天气雷达探测效能。发射功率决定探测距离与回波强度,需权衡能耗与干扰;天线增益、波束宽度和方向图影响精度与覆盖,高增益窄波束提升分辨率,相控阵支持快速扫描;接收机灵敏度关乎弱信号检测,需结合降噪技术;天气雷达须长期稳定运行,依赖可靠设计与定期维护,如校准和部件更换。综合优化参数与运维,

方可提升整体探测能力。

3 评估指标体系

3.1 探测精度

探测精度关乎天气雷达效能,受硬件性能与复杂天气影响,在强对流中误差达 20% - 30%。通过先进信号处理与多源数据融合校准,可有效提升测量准确性与可靠性。

3.2 覆盖范围

天气雷达覆盖范围受发射功率、天线高度和波束宽度影响,可达数百公里,但地形和建筑易造成盲区。通过多天气雷达组网协同观测,可实现无缝覆盖。我国天气雷达网已基本覆盖全国,显著提升监测与预警能力。

3.3 时间分辨率

时间分辨率体现天气雷达对天气变化的实时监测能力,对强对流等突发天气预警至关重要。现代天气雷达通过快速扫描与高效数据处理技术,缩短更新间隔至几分钟内,有效提升监测时效性。

3.4 可靠性

天气雷达的可靠性关乎预报与预警效果,受设备质量、维护及环境等因素影响,恶劣条件下易故障。需通过定期维护、冗余设计、备用系统及故障预警机制,提升其稳定性与连续性^[2]。

4 模型构建方法

4.1 数据预处理

数据预处理是模型构建的基础,需将原始天气雷达数据转化为适合建模的形式。针对电磁干扰等因素导致的缺失值和异常值,采用插值或统计方法处理;为消除量纲差异,对反射率因子等变量进行最小 - 最大或 Z-score 归一化;同时利用移动平均法平滑数据,降低噪声,突出长期趋势,提升稳定性。

4.2 特征提取

特征提取旨在从预处理数据中识别反映天气雷达探测效能的关键信息。基于物理特征的方法利用反射率因子、径向速度和谱宽等参数,分析降水强度、分布及天气系统结构;统计特征则通过均值、方差、偏度、峰度刻画数据分布与波动,并结合傅里叶变换、小波变换等时频分析技术,捕捉周期性与瞬态变化,提升对天气雷达回波信号的解析能力与模型性能。

4.3 权重分配

权重分配用于确定特征重要性,提升模型准确性。主观赋权法(如专家打分)依赖经验,主观性强;客观赋权法(如熵权法)基于数据信息熵,客观但忽略先验知识。

组合赋权法融合两者, 先由专家打分再用熵权法调整, 兼顾专业经验与数据特性, 提高权重合理性。

4.4 算法选择

算法选择需结合数据特点与建模需求。线性回归适用于线性关系, 计算简单但难处理非线性; 决策树可处理非线性和多分类, 直观易懂但易过拟合; 神经网络擅长高维复杂数据建模, 如用 MLP 或 CNN 提取天气雷达图像特征, 但训练耗时且解释性差。应根据数据特性选用算法, 并通过调优提升性能^[9]。

5 实验设计与验证

5.1 数据来源

天气雷达探测效能评估模型的构建依赖于多样且可靠的数据来源。天气雷达自身采集的高精度数据是核心, 如多普勒天气雷达每 5 分钟完成一次全空域扫描, 获取降水强度、回波顶高、径向速度等数千个数据点, 实时反映降水系统的动态。气象卫星数据作为重要补充, 具有覆盖广、时间分辨率高的优势, 风云系列卫星提供的云图、温湿等信息可与天气雷达数据相互印证, 提升大范围天气过程监测的准确性。地面气象观测站则提供温度、气压、湿度、风速等实测数据, 有助于分析天气雷达探测在特定环境下的偏差。例如, 山区观测发现高湿度条件下天气雷达降水估测易出现偏差, 为模型优化提供依据。多源数据融合不仅增强了模型的准确性, 也提升了其泛化能力, 是构建高效评估体系的关键。

5.2 实验场景

为全面评估天气雷达探测效能, 设置了降水、山区和海洋三类实验场景。在降水实验中, 天气雷达对暴雨的探测结果与地面雨量计存在差异, 可能受降水粒子大小和分布不均影响; 对流性降水因垂直运动强、持续时间短, 探测准确性较低。山区地形复杂, 山脉遮挡导致天气雷达电磁波传播受限, 山谷及背风坡形成探测盲区, 回波信号弱, 可通过增设天气雷达站点或多天气雷达组网提升覆盖。海洋表面粗糙度高、水汽丰富, 影响天气雷达探测性能, 船载天气雷达对海上风暴探测效果较好, 但对雾区等小型目标探测能力较弱, 主要受海面反射和散射干扰。各类环境均对天气雷达探测带来挑战, 需结合实际条件优化布局与技术参数。

5.3 结果对比

将天气雷达探测结果与多种参考数据对比是评估其效能的重要手段。与地面雨量计对比可检验降水强度的准确性, 实验显示二者在多数时段相关性较好, 但在降水起止

阶段存在滞后或提前现象, 可能与天气雷达探测原理和数据处理有关。卫星云图提供大范围云系信息, 与天气雷达回波图对比发现, 天气雷达能清晰识别台风眼和螺旋雨带, 但边缘区域分辨率较低, 受限探测范围。数值天气预报模式则可用于预测验证, 实验表明其在降水前与天气雷达数据基本一致, 但在降水过程中, 天气雷达能更及时准确地反映变化, 凸显其在短期监测中的优势, 并为预报模式提供实时修正依据。

5.4 效能分析

通过对天气雷达探测效能的实验分析, 从精度、覆盖范围和可靠性等方面评估其性能。在降水强度较低时, 天气雷达探测误差较小, 但在大雨或暴雨条件下误差可达 20% 以上, 主要受降水粒子特性和信号衰减影响, 采用双偏振天气雷达可提升精度。平原地区天气雷达覆盖可达上百公里, 而在山区或城市因地形遮挡和建筑干扰, 覆盖显著缩小, 可通过多天气雷达组网扩大监测范围。天气雷达设备的稳定性与数据传输可靠性直接影响探测效果, 设备故障和电磁干扰可能降低系统可靠性, 需加强设备维护、定期校准, 并采用冗余传输方式保障数据及时准确送达。实验揭示了天气雷达在不同环境下的问题并提出了改进措施, 随着技术进步, 天气雷达的探测能力将持续提升, 为气象预报与灾害预警提供更有有力支持。

6 模型优化策略

6.1 参数调整

在天气雷达探测效能评估模型优化中, 参数调整至关重要, 直接影响评估结果的准确性。天气雷达的脉冲重复频率 (PRF) 需根据探测需求动态调整: 强对流天气中提高 PRF 可扩大不模糊速度范围, 如将 PRF 从 1000Hz 提升至 1500Hz, 气流速度测量误差由 $\pm 5\text{m/s}$ 降至 $\pm 3\text{m/s}$; 大范围监测时则需降低 PRF 以拓展探测距离。此外, 发射功率和天线增益也需因地制宜: 山区探测可提高发射功率以克服信号衰减, 城市环境中则通过调节天线增益使波束更集中, 提升分辨率并减少障碍干扰。合理配置这些参数能显著增强天气雷达在不同气象条件下的探测精度与可靠性。

6.2 多源融合

多源融合能有效提升天气雷达探测效能评估的准确性与可靠性。单一天气雷达数据易受天气、地形等因素影响, 存在不完整和误差问题, 而融合气象卫星、地面观测站和风廓线天气雷达等多源数据, 可互补优势、弥补不足。卫星提供大范围云层结构与水汽信息, 地面站获取温度、湿度、气压等实况数据, 风廓线天气雷达则提供垂直风场信

息,结合天气雷达数据可全面掌握气象状态,增强目标识别与预测能力。例如在降水监测中,融合多源数据有助于分析降水成因与演变,提升降水类型判断精度;研究显示,暴雨过程中融合多源数据使起止时间与降水量预测准确率分别提高 15%、20% 和 18%。融合方法包括数据层(直接融合原始数据,信息保留多但处理复杂)、特征层(提取后融合特征,提升效率)和决策层(独立决策后融合结果,增强可靠性),可根据需求选择应用。

6.3 动态更新

天气雷达探测效能评估模型需动态更新以应对气象条件和设备性能的实时变化,确保评估结果的准确性与可靠性。动态更新包括数据的实时获取与模型参数的自适应调整。通过持续接入天气雷达、气象卫星及地面观测站的最新数据,模型可及时反映天气变化,如风暴的发展与移动。同时,针对气象条件改变或设备老化(如发射功率下降、天线增益衰减)带来的影响,需动态调整模型参数进行补偿。研究显示,采用自适应滤波算法可根据实时数据自动优化参数,有效提升模型的适应性与精度。在长期监测中,该方法能持续控制评估误差,保障对气象目标的稳定、准确追踪,显著增强模型的实用性与鲁棒性。

7 结语

本研究构建了天气雷达探测效能评估模型,通过分析天气、地形和设备等因素,建立了涵盖探测精度、覆盖范

围、时间分辨率和可靠性等指标的评估体系。采用数据预处理、特征提取与合理权重分配,结合优选算法提升模型准确性与稳定性,并通过实际数据与模拟场景验证,有效支持天气雷达配置优化。应用中发现并弥补了部分区域的探测盲区,提升了监测能力。然而,极端天气下数据质量仍存误差,评估体系尚未涵盖所有新兴气象因素,权重适应性及实验广度有待增强。未来将融合机器学习与深度学习提升数据质量,完善指标体系,引入动态权重机制,扩大多地区、多场景实测验证,探索多天气雷达协同探测。结合物联网、大数据与人工智能技术,推动模型向更高效、智能方向发展,为气象监测网络建设提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 姜璐,刘春辉,赵雪明等. 气象雷达设备在复杂气象条件下的探测精度分析[J]. 农业灾害研究, 2025, 15(04): 193-195.
- [2] 李梅,吴焕萍,张帅等. 气象雷达探测资料在气候研究中的应用综述[J]. 气象科技进展, 2025, 15(01): 30-38.
- [3] 吕雪芹,敖振浪,黄宏智. 天气雷达探测有效立体空域计算方法研究与实现[J]. 气象水文海洋仪器, 2023, 40(02): 1-4.DOI:10.19441/j.cnki.issn1006-009x. 2023.02.006.

作者简介:李国虎(1975.12-),男,汉族,四川西昌,大学本科,高工,研究方向:气象。