

天气雷达组网观测数据质量控制与融合研究

罗桑旦增¹ 罗珍^(通讯作者)² 洛桑平措¹ 洛桑顿珠¹

1 西藏自治区大气探测技术与装备保障中心, 西藏拉萨, 850000;

2 西藏自治区气候中心, 西藏拉萨, 850000;

摘要: 本文主要研究青藏高原地区地形复杂、天气系统特殊给雷达观测数据带来的影响, 并提高天气雷达组网数据的可靠性以及应用价值。通过对高原环境下雷达数据典型的误差源进行系统的分析, 提出了一个包含地物杂波抑制、速度退模糊、衰减订正和系统偏差校准的综合质量控制流程。在此基础上又提出了适合于多波段、多型号雷达数据的融合分析方法, 可以得到三维空间中具有较高分辨度和一致性反射率以及风场的产品。本研究所建立起来的技术体系, 给高原和类似的复杂地形区精细化气象监测预警提供了一种可行的方法。

关键词: 天气雷达组网; 数据质量控制; 数据融合; 青藏高原

DOI: 10.6979/3041-0673.26.05.007

引言

青藏高原属于重要的天气气候敏感区, 它的气象监测精度对于下游地区的天气预报以及防灾减灾有着十分关键的作用。由于高原复杂的地形地貌造成单部雷达观测出现严重的遮挡和衰减, 并且局地强对流生消速度很快, 所以对观测的时空连续性有更高的要求。利用多部雷达构成观测网, 对得到的多种数据加以有效质量把控并实施深度整合, 这是冲破单一观测范围束缚、取得优良三维大气结构信息的必然走向。本文主要针对西藏地区实际观测需要, 对高原环境下雷达组网数据质控和融合技术进行探索, 并形成一套适合高原环境的数据处理方法。

1 组网观测数据质量控制方法

天气雷达原始数据中有大量的非气象回波、观测误差等, 直接使用会影响后面分析、预报的准确度。因此质量控制是雷达数据应用的第一个步骤, 它的目的就是找出并去除或者修正干扰信息, 只留下真实的气象信号。

1.1 典型干扰识别与抑制技术

高原雷达站经常受到山脉等地形的影响而出现稳定的地物杂波。传统的静态杂波图法在天气变化的时候容易把降水回波误剔除掉。使用动态谱滤波技术, 在雷达站周围用数字高程模型来区分静止地物和移动的降水目标。对由于飞机、风力发电机组等产生的间歇性非降水回波, 用它的回波纹理特征、空间连续性差和与卫星云图、自动站降水资料的匹配程度来实现智能识别并

剔除^[1]。为了克服日益严重的电磁干扰问题, 在信号处理层面上做频域分析以及自适应滤波, 可以有效地抑制某个频率范围内的干扰噪声。近些年来, 人工智能技术在这一方面表现出巨大的潜力, 依靠深度学习的模型可以从大量的历史数据当中学会复杂的回波特征, 对于电磁干扰、故障坏图这些异常的数据来说, 其识别准确率可以达到98%以上, 给自动化、智能化的质控流程带来了新的想法。

1.2 观测误差订正算法

雷达观测的误差有速度模糊和传播路径上衰减这两种。对多普勒速度模糊, 从单个雷达角度出发用连续性检查和双脉冲重复频率的方法来进行退模糊。从组网角度来讲, 可以依靠相邻雷达的重叠部分来对风场加以互相校验并予以修正, 从而提高退模糊过程中出现的各种情形下的成功率。研究表明, 在利用多种去模糊算法(迭代法、用正弦函数的算法等)对数据集进行处理之后再融合, 可以有效地提高稀疏或者复杂的区域的数据质量, 比单独使用一种算法的效果更好。衰减订正对C波段、X波段雷达的强降水信号衰减来说十分重要。采用基于双偏振参数(比如差分相位 Φ_{DP})的约束迭代法, 利用 Φ_{DP} 对于衰减不敏感的特点, 逐层反演路径积分衰减, 并做相应的补偿, 这种方法对高原上常见到的强对流降水有较好的订正效果。另外定期对雷达系统的标定做发散功率、接收机增益等的检测和调整, 这是保证控制性误差小、保持数据长期一致性的前提^[2]。中国气象局已经发布了行业标准《气象观测资料质量控制天

气雷达》，对衰减订正等各个环节的质控方法进行了进一步的规范。

2 多源雷达数据融合技术

经过严格的质控后得到的单站雷达数据，需要用到融合的方法来生成一个时空上一致、覆盖范围完整的一组产品。融合的关键就是克服各个雷达之间坐标、分辨率、观测时间以及物理量等各方面的差别。

2.1 坐标系统一与数据匹配

不同的空间位置的雷达，观测到的数据都在以自身为圆心的球坐标系里。融合的第一步就是把所有的雷达基数据（反射率，径向速度等）插值到同一个三维笛卡尔网格上。本文所选双线性插值法是兼顾计算效率和精度的一种双线性插值方法。高原地区网格设计要考虑到地形起伏，使用可变的垂直分辨率，在近地面层设置更高的分辨率来捕捉边界层的过程。时间同步上，对于组网内各个雷达体扫起始时间微小的差别，采取了用最近一次体扫时间作为基准，在一定的时间容差范围内对数据进行对齐的方法来保证融合产品的时效性。该过程和建立实时定量降水估计(QPE)系统的思想是一致的，都是重视各个数据之间时间、空间上的精确匹配。

2.2 多雷达数据合成与风场反演

在同一个三维网格中，同一个格点会被多个雷达同时观测到。对反射率因子用最大反射率法或者加权平均法来合成。最大反射率法可以最大程度地保留强对流核心的信息，加权平均法则可以生成更加平滑、具有统计代表性更强的场，权重根据雷达距离格点的距离以及波束遮挡情况来动态计算。风场信息只有单个雷达可以给出径向速度。组网观测可以对同一个空间点的风矢量从各个角度进行约束。根据几何方程组反演得到该点的水平二维风场(u、v分量)。在西藏地区，根据合理的雷达网架，在反演算法中加入质量控制以及连续性的限制条件之后，可以得到较为准确的小尺度对流系统三维动力结构，给机理剖析及数值预报同化赋予重要输入^[3]。融合产品可以利用再分析资料和数值模型来进行质量评价。例如，利用WRF(Weather Research and Forecasting)模式在高原的模拟结果，可以检验融合风场在描述系统动力过程方面的合理性。

2.3 双偏振参量在质控与融合中的深化应用

由于新一代双偏振天气雷达正在向青藏高原陆续布设，因此差分反射率(ZDR)、差分传播相位(Φ_{DP})以及相关系数(rhv)这些偏振参数被加入进来之后，给数据质量把控及融合剖析赋予了新的技术途径。偏振量对于降水粒子的形状、相态、粒径分布都很敏感，可以从物理机理上将气象目标和非气象目标区分开来。地物杂波、生物回波相关系数一般小于0.70，气象降水回波 ρ_{HV} 一般大于0.90；利用这种明显差别，在模糊逻辑分类体系里加入偏振特征向量，就能达成比谱宽、径向速度判断更加精确的杂波剔除效果。

多站融合时各个型号或者不同波段的雷达之间存在着偏振参数上的系统误差，在融合之前需要做交叉标定。选取均匀弱降水样品为“标准场”，对每个站点的ZDR偏差进行拟合，并予以修正；用轻降水时段 ρ_{HV} 概率分布一致性的检验来评价各个站点接收机的性能，保证多站偏振量在融合产品中具有系统一致性。双偏振融合技术可以提高定量降水估计的准确性，并且为以后使用相控阵偏振雷达以及进行粒子相态三维分布反演打下了良好的基础，是高原雷达组网质量控制和融合系统的重要部分^[4]。

3 高原应用效果验证

3.1 技术流程的业务化集成

依托中国气象局天擎大数据平台技术架构和数据支持基础，根据西藏高原气象观测业务的实际需求，创建起天气雷达组网质量控制融合一体化业务处理流程，从而达成由多源雷达基数据接入直至融合产物出全过程的自动化、标准化运作。该流程可以实时汇集西藏辖区内的新一代天气雷达站、风廓线雷达站观测基数据，用模块化的质控算法做单站的精细化质量控制，并把经过质控后的标准化数据插值到青藏高原专属的 3×1 水平分辨率、500米垂直分辨率的三维网格上，再使用多雷达数据合成、风场反演等核心技术算法进行处理，从而在分钟级内输出出三维反射率拼图、垂直最大反射率、组合反射率、二维水平风场等多种融合产品。该流程把高质量的数据输入当作基础，稳定的融合算法当核心来运作，保证业务运行的稳定、实时和标准，并且其技术逻辑同多源降水融合产品的构建需求紧密关联起来^[5]。

3.2 质控与融合技术效果量化检验

对质量控制前后雷达观测数据、单站雷达原始数据

和组网融合产品做多维度、全指标的定量对比分析,检验综合质控流程和多元雷达融合技术实际应用效果。经过综合质控处理之后,系统对于高原地区典型的地物杂波、超折射回波这些非气象回波的识别剔除精度得到了明显改善。多雷达组网融合技术很好地克服了单个雷达由于高原复杂地形遮挡造成的观测盲区问题,解决了单个雷达观测时空连续性较差的不足,实现了对整个高原大气系统的全域、连续、三维立体监测。融合反演得到的风场数据与地面气象实况观测的匹配度明显提高,可以准确刻画出高原中小尺度天气系统动力结构的特点,给高原天气系统的监测分析、诊断研判提供全面、精准的观测数据支撑,大大提升了对高原强对流天气的监测能力。

3.3 综合性能评估与不确定性分析

根据青藏高原不同海拔梯度、不同类型天气系统的特征来开展雷达组网质控融合技术体系的综合性能评价工作,主要测试 QPE、风场反演这些关键融合产品是否适应于高原地区,并对其准确率作出评判。在海拔 4000 米及以下的高原中低海拔地区,融合后的雷达 QPE 产品与青藏高原高分辨率格点降水数据集的相关性较好,相关系数大多大于 0.78,对于强降水区段的估计精确度较高,在高原短临气象预报以及气象灾害监测预警等方面具有很强的实际应用价值。在海拔超过 4500 米的高原极高海拔地区,由于降水相态变化频繁多端、雷达波束高度较高造成近地面观测效果不佳、极端恶劣环境使设备运行状况不容乐观等诸多方面的制约作用下,雷达 QPE 产品估测误差不断加大。融合风场产品不确定性的产生有两个来源,一个是雷达径向速度原始观测环节中存在误差的传递过程,另一个则是当雷达在探测范围有限且缺少足够的观测点时,在进行风场反演的过程中,因为缺少足够的观测信息,从而做出一些假定性的偏差。现阶段可利用集合卡尔曼滤波等数据同化手段,把融合风场当作初始场输入到中尺度数值预报模式里,以此来定量评价融合风场对于高原短时天气预报的改善情况,并准确找出风场信息的不确定性来源及影响大小,进而为之后算法改良和技术体系健全给予科学的量化支撑。

4 结论与展望

针对青藏高原特殊的观测环境,开展天气雷达组网数据质量控制和融合的研究,对提高青藏高原气象监测预报水平具有十分重要的意义。本文创建起一套由单站数据质量把控延伸至多站三维融合的技术链,在实际应用中对其的有效程度做了检验。经过处理后高质量、高时空分辨率的雷达融合产品大大提高了对于高原中小尺度灾害性天气的识别与诊断水平,给短临预报、数值模式同化以及灾害风险评估等提供可靠的资料支撑。

未来的工作应该在以下方面继续深入下去:第一,人工智能和机器学习的应用会成为质控技术发展的重要方向。使用卷积神经网络、Transformer 等模型可以得到更加准确、更加自适应的非气象回波识别和分类结果,可以直接用作数据修复和增强。第二,对于双偏振、相控阵等新的雷达观测数据要开发相应的精细质量控制以及融合算法,充分发挥偏振信息对粒子识别、降水估计和衰减修正的作用。另外需要发展更加完善的不确定性量化方法,给每一个格点赋予置信度信息,提高它在数据同化等高级应用中所具有的价值。最后,推动雷达组网产品同卫星、地面自动站、数值模式产品进行深度协同融合,创建起空天地一体化综合观测分析体系,就是破解高原复杂天气监测难题的必然走向。依靠不断的科技创新和业务更新,将会给青藏高原以及全球类似的地形区域气象灾害防治和气候变化研究赋予更强的观测支持。

参考文献

- [1] 鲁德金, 胡姮, 吴蕾, 等. 天气雷达间一致性评估算法影响因子分析及改进[J]. 气象, 2024, 50(4): 475-487.
- [2] 余乐福, 姚聃, 肖艳姣, 等. 一种 X 波段相控阵天气雷达反射率因子订正算法[J]. 暴雨灾害, 2023, 42(4): 446-455.
- [3] 闵锦忠, 吴婷, 王世璋. 雷达资料质量控制对风暴尺度数值预报的影响研究[J]. 气象科学, 2013, 33(4): 396-403.
- [4] 肖艳姣, 刘黎平. 新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究[J]. 气象学报, 2006, 64(5): 647-657.
- [5] 杨洪平, 张沛源, 程明虎. 新一代天气雷达定量估测降水集成系统[J]. 气象, 2005, 31(9): 18-22.