

毫米波云雷达径向速度退模糊算法设计

刘光普¹, 梁 莺¹, 刘可邦²

(1. 福建省大气探测技术保障中心, 福州 350008;

2. 中国航天科工集团 第二研究院二十三所, 北京 100854)

摘要: 为了有效解决毫米波云雷达径向速度在快速变化的天气过程中出现大范围速度模糊的问题, 根据扫描型毫米波云雷达的设备性能和观测特点, 借助图像识别技术设计雷达速度退模糊方法并进行分析, 借助 Sobel 算子识别出速度模糊区域边缘的模糊指数作为模糊线, 将数据划分为不同区域, 通过模糊逻辑选取最可能的非模糊区, 对剩余区域进行逐步外推和订正, 并对订正结果进行二次模糊检查, 修正因模糊区识别错误导致的速度偏差; 选取 200 组试验数据检验算法的适用性及准确性, 结果表明, 本算法适用于毫米波云雷达的 PPI、sPPI 和 RHI 等多种扫描模式, 对 90% 以上的速度模糊数据实现退模糊处理, 为提高毫米波云雷达的数据质量提供新的思路和方法。

关键词: 毫米波云雷达; 径向速度; 图像识别; 速度退模糊; 外推

Design of Radial Velocity De-aliasing Algorithm for Millimeter Wave Cloud Radars

LIU Guangpu¹, LIANG Ying¹, LIU Kebang²

(1. Fujian Meteorological Observation and Technical Support Center, Fuzhou 350008, China;

2. The 23th Institute of Second Academy of China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100854, China)

Abstract: In order to solve the issue of large-scale aliasing in the radial velocity of millimeter wave cloud radars in the process of rapidly changing weather, according to the equipment performance and observation characteristics of scanning millimeter-wave cloud radars, a radar speed de-aliasing algorithm is designed, which is tested and evaluated with the help of image recognition technology. The Sobel operator is aimed to identify the fuzzy index at the edge of the velocity blurred region as the fuzzy line, divide the data into different regions, select the most likely non-fuzzy region through fuzzy logic, perform stepwise extrapolation on remain regions, conduct a secondary blur check on the second correction result, and then correct the velocity deviation caused by the fuzzy region recognition error. Selecting 200 sets of experimental data to test and evaluate the applicability and accuracy of the algorithm, the results show that the algorithm can achieve a defusing process for more than 90% of speed-blurred data, and is suitable for various scanning modes such as Plan Position Indicator (PPI), Several Plan Position Indicator (sPPI) and Range Height Indicator (RHI) of millimeter-wave radars, which provides a new idea and method for improving the data quality of millimeter-wave cloud radars.

Keywords: millimeter wave cloud radar; radial velocity; image recognition; speed de-aliasin; extrapolation

0 引言

大气中云的结构和类型变化在地球辐射收支、水和生物化学循环调节中发挥着重要作用, 云的水平 and 垂直运动的准确观测及反演, 对研究大气物理过程变化以及提高天气预报和改进气候模型具有重要的意义。云的水

平和垂直结构本身具有的随机性和不确定性, 对观测设备的性能指标和观测数据的精准程度提出了越来越高的要求^[1]。目前对云的观测主要依靠卫星、飞机和地面气象自动站等仪器设备, 利用气象卫星和飞机进行云的自动观测和分离时, 受上层云系干扰, 无法全天候实时观测, 同时由于时间和空间分辨率的限制, 无法对小范围

收稿日期:2025-05-08; 修回日期:2025-07-17。

基金项目:福建省自然科学基金项目(2024J011141);华东区域气象科技协同创新基金合作项目(QYHZ202314);中国气象局海峡灾害天气重点开放实验室项目(2022K04)。

作者简介:刘光普(1985-),男,硕士,高级工程师。

引用格式:刘光普,梁 莺,刘可邦.毫米波云雷达径向速度退模糊算法设计[J].计算机测量与控制,2026,34(5):232-238.

短时间的云物理过程进行精密观测,只能对持续时间较长和具有一定覆盖范围的大面积云天气过程进行监测;自动气象站受地理条件和设备性能的限制,单点观测设备取样空间小,观测数据仅代表设备周边很小范围的天气变化特征,对于分布广、空间差异大、生消快的云的过程观测具有较大的不确定性,无法准确获取整个云系的发展过程及空间结构,这些方式均难以准确获取云体宏观和微观特征的实时变化,无法充分开展云体精细化的观测、预报和服务^[2]。毫米波雷达作为新型的测云设备,具有很高的灵敏度和发射功率,不仅能够精细探测多层云体内部的水平和垂直结构,还能够获取高时空分辨率的观测数据,并且能够对于研究云物理特征以及云与降水的发展演变有着重要的帮助,是短时临近天气预报的重要手段之一^[3]。

毫米波云雷达径向速度退模糊作为雷达数据处理的核心技术,在修正观测误差、还原大气运动真实状态方面具有不可替代的作用。毫米波云雷达径向速度退模糊是连接雷达硬件观测与气象应用的关键环节,通过算法或软件技术手段提高雷达观测天气能力,为气象业务提供去伪存真的速度场数据^[3]。毫米波云雷达径向速度退模糊算法在气象业务领域具有显著的应用价值,通过消除速度折叠误差,提升雷达观测数据的准确性和可靠性,进而推动短时临近天气预报、云物理过程研究及气候模型改进的发展。退模糊算法是毫米波云雷达数据质量控制的核心环节,通过消除速度折叠误差,雷达数据的可用性从不足70%提升至95%以上,为气象业务和科研提供了更完整的观测基础^[4]。在短时临近天气预报应用方面,毫米波云雷达能够捕捉云内精细的垂直气流结构,而退模糊算法通过恢复真实的径向速度,可精准识别风暴的上升气流强度、下沉气流区域及水平风切变特征,并且退模糊算法通过订正速度折叠导致的谱宽展宽,更精确地反演降水粒子的下落末速度,提升定量降水估计的精度^[5]。在云物理研究方面,通过解析云内动力学与微物理速度场信息,反演云内垂直气流和湍流强度,揭示云滴、冰晶的生成、增长及沉降机制,区分冰水混合相态的谱特征,为云微物理参数化方案提供关键观测依据^[6]。毫米波雷达对小粒子的高敏感性使其在气溶胶-云相互作用研究中具有优势,退模糊算法通过消除速度折叠干扰,可清晰观测气溶胶层与云底的垂直运动耦合现象^[7]。在气候模型改进效果方面,退模糊后的毫米波雷达数据能够提供高分辨率的云垂直结构,验证模型中云生成和消散的物理过程。长期观测数据结合退模糊算法,能够分析云特性的气候态变化,为气候变化归因研究提供了直接证据^[8]。毫米波云雷达径向速度退模糊算法通过解决速度折叠,提升了雷达数据在气象业务中的应用价值。

由于毫米波云雷达在气象业务中应用起步较晚,加之早期研究主要聚焦于雷达回波强度衰减问题,缺乏对雷达径向速度模糊的深入研究。随着毫米波雷达观测目标从非降水云扩展到弱降水和对流云,由于速度模糊导致的雷达数据质量问题逐渐引起专家和学者的重视^[9]。但是针对毫米波雷达速度退模糊技术和方法的研究,目前主要分为两个方向,一方面是将厘米波雷达速度模糊处理中成熟的方法移植到毫米波雷达,根据k邻域频数法预处理S波段天气雷达数据,同时结合“双径向-双切向”技术开展速度模糊的处理,采取折叠线跟踪算法或者借助二维多路实现速度的自动退模糊等方法;另一方面主要针对垂直指向型的毫米波雷达,利用五点平均和交互检验的方法开展不同云体的雷达速度模糊处理,或者利用雷达谱数据进行速度模糊的处理并评估速度模糊程度对云降水探测数据的影响。由于扫描型和垂直指向型毫米波云雷达观测模式和数据上的差异,上述方法和技术不仅需要提前获取背景风场资料,而且多数仅适用于雷达特殊的观测模式,并不适用于实时业务运行应用^[10-13]。本文提出的算法综合考虑径向速度在时间和空间两个维度上的连续性,通过图像处理技术从雷达扫描生成的二维数据中提取正常数据与模糊数据之间的突变线,划分连续区域,并以各个连续区域为处理目标,借助模糊逻辑技术自动识别非模糊区,完成雷达径向速度数据的退模糊工作,本算法提供了一种适用于扫描型毫米波云雷达多种扫描模式,提供适用于扫描型毫米波云雷达平面位置显示Plan Position Indicator (PPI)、多平面位置显示sPPI和距离高度显示Range Height Indicator (RHI)等毫米波云雷达多种扫描模式径向速度退模糊的解决方法,并通过样本数据对速度退模糊的效果进行试验分析。

1 设备与数据

毫米波云雷达波长与非降水云滴、微小冰晶等小尺度粒子的尺度更为接近,能够增强微小气象目标信号的捕捉能力。雷达利用窄波束技术提升空间分辨率,更精准地聚焦探测目标,实现精细化观测。毫米波云雷达利用不同的扫描策略和观测模式,有效探测距离达36 km,结合高空间分辨率,能够全方位、高时效地捕捉大气水平和垂直结构的动态变化^[14-15]。为了满足云雾、弱降水等微弱信号准确探测的需求,使用长短脉冲宽度结合的方式,虽然能够增强雷达探测弱信号的能力,但是会减小雷达的最大不模糊速度测量范围,观测快速移动的目标物时会出现速度模糊。在出现云雾、弱降水等天气现象时,云雾和雨滴粒子随风移动的速度将超过雷达的最大不模糊速度,导致雷达数据出现速度模糊现象^[16]。

毫米波云雷达基于粒子对电磁波的散射作用与退极

化效应,通过解析回波信号的强度、相位及极化特性,可实时获取探测范围内气象目标物的位置、空间分布、强度、运动速度、谱宽以及双极化参数等信息,利用粒子的后向散射与多普勒效应能够准确获取大气中目标物的大小和速度,距离、速度和雷达波长之间的关系为:

$$RV = (\lambda c)/8 \quad (1)$$

其中: R 表示雷达通过发射和接收信号之间的延迟测量的目标物与雷达之间的距离; V 表示通过粒子的多普勒频移测量的沿雷达径向的移动速度; λ 表示雷达的工作波长; c 表示光速,其值取 3.0×10^8 m/s。

毫米波云雷达通过探测大气中目标物的后向散射信号获取径向速度信息,然而受脉冲重复频率限制,当目标实际运动速度超过雷达最大可测速度阈值时,观测值会出现“折叠”现象,导致速度场失真,雷达在特定脉冲重复频率模式下存在最大可测速度上限,当目标实际径向速度超出此范围时,观测值将被错误映射为较小数值,出现速度模糊。由于雷达的工作波长 λ 为固定常数,因此雷达无法同时获取目标物的最大不模糊距离和最大不模糊速度。当最大不模糊距离 R_{\max} 确定后,目标物的径向速度大于最大不模糊速度 V_{\max} 时产生速度模糊,即多普勒体制雷达能够测量的径向速度范围是有限的,即存在一个最大不模糊速度 V_m ^[17]。当实际径向风速在 $\pm V_m$ (目标物靠近雷达移动时速度为负值,远离雷达移动时速度为正值) 范围内时,雷达探测的径向速度数据真实可信,但目标物实际径向风速超过 $\pm V_m$ 后,雷达测得的径向数据 V_o 依旧在 $\pm V_m$ 范围内,雷达径向数据出现速度模糊^[18]。目标物真实的径向速度 V_i 与雷达观测的径向速度 V_o 之间的关系为:

$$V_i = V_o \pm 2n \times V_m \quad (2)$$

其中: n 为整数。

最大不模糊速度 V_m 与雷达波长 λ 与雷达脉冲重复频率 f 之间的关系为:

$$V_m = \lambda \times f/4 \quad (3)$$

由于毫米波云雷达波长 λ 仅为 8 mm,根据公式(2)(3)可知,当雷达脉冲重复频率一定时,雷达具有较小的最大不模糊速度 V_m ,当目标物移动速度较快时,容易出现速度模糊现象。因此,在使用毫米波速度数据前要先对速度数据进行退模糊处理,保证雷达速度数据的准确性。

台湾海峡西岸海雾发生频率南部沿海多于北部沿海,中南部沿海地区是多雾的区域,尤其是崇武、厦门和东山等地,海峡西岸沿海的海雾发生前地面一般为西南风到偏北风,发生时一般为东北至东南风,风速小于 5 m/s ^[19]。统计 2021 年至 2023 年毫米波云雷达观测数据,结合毫米波云雷达部署地天气气候特征,发现三月份伴随大风的云雾和弱降水天气过程,雷达观测数据样

本多,数据获取率高,由于大风更易出现数据模糊现象,因此选取 2021 年至 2023 年期间三月份云雾、降雨天气下出现数据模糊的 200 组数据进行分析,180 组数据作为算法评估的样本集,均匀采样选取 20 组试验数据作为算法改进的样本集。

2 算法设计

基于毫米波云雷达回波相位和时空连续性特征开展雷达径向速度退模糊的处理,通过数学建模和图像处理技术实现速度模糊的识别与订正。雷达径向速度是回波信号的多普勒频移,存在随机噪声和系统噪声,并且速度边缘代表大气动力学结构突变,需要分析大尺度、连续信号的物理边缘特征,而非细微纹理结构,实时观测分钟数据量大,而气象业务需要实时数据的快速处理,这就要求算法具备低计算复杂度,避免处理延迟,同时当噪声与真实边缘的信号强度接近时,传统高精度算法复杂的参数配置和计算流程,易将噪声误判为边缘或遗漏弱信号边缘。Sobel 算子通过模型对邻域数据加权平均,抑制小尺度噪声,对非平稳噪声的鲁棒性更强,并且在卷积和梯度计算时无需额外滤波,实现数据的毫秒级处理,计算量约为 Canny 的 1/5,而 Canny 需要通过手动设置高斯滤波,参数自适应调整流程繁琐,复杂算法流程导致秒级延迟,无法满足气象观测和预警的时效要求,并且毫米波云雷达重点关注大尺度结构的风速变化,Sobel 的算子模型更好的匹配该特征的检测尺度,而 Canny 因高精度特性可能过度检测小尺度噪声波动,导致边缘冗余和误判。因此 Sobel 算法在毫米波云雷达数据处理中具有抗噪声能力强、计算速率快、参数自动匹配、大尺度边缘灵敏度高等特点,能够快速准确地反映大气风场和动力参数的变化特征。

毫米波云雷达将一次扫描得到的原始径向速度数据依次经过模糊线提取、非模糊区判定、模糊数据订正、二次模糊检查等处理后获取退模糊后的径向速度数据,根据 PPI、sPPI 和 RHI 等扫描模式的特点采取不同的数据处理方式,毫米波云雷达速度退模糊算法流程如图 1 所示。

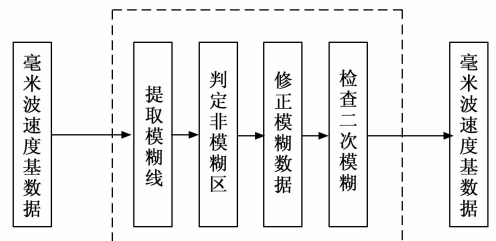


图 1 毫米波云雷达速度退模糊算法流程

2.1 Sobel 算法提取模糊线

毫米波云雷达由于最大不模糊速度 V_m 较小,在

云、雨等目标物快速移动时容易出现速度模糊。当速度接近最大不模糊速度 $\pm V_m$ 时, 原本连续的径向速度数据会出现明显的突变, 即径向速度数据由 $V_m - \Delta V_1$ 跳变到 $-V_m + \Delta V_2$ (或反向跳变), 形成明显的速度模糊线, 其中 ΔV_1 、 ΔV_2 为正数小值。通过速度模糊线, 将原始径向速度数据分隔为不同的区域, 区域内部速度变化连续, 区域与区域之间存在速度折叠现象^[20]。速度模糊线本质上是速度出现跃迁的位置, 速度变化产生了不同的梯度值, 进而在速度模糊线出现速度强弱和方向的变化。结合高斯平滑和微分求导的离散微分 Sobel 算子, 通过计算速度模糊线的近似梯度, 识别、定位和处理速度模糊线。根据一阶差分计算相邻数据之间的变化率, 利用卷积和特定的算子计算相邻数据的变化率, Sobel 算子能够同时计算相邻 3 个点之间的变化率, 同时根据上下左右相邻数据的灰度差求取水平和垂直方向上的边缘以及梯度变化, Sobel 算法如下:

$$SX(x, y) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 V(x+i, y+j) * SobelX(i, j) \quad (4)$$

$$SY(x, y) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 V(x+i, y+j) * SobelY(i, j) \quad (5)$$

$$S(x, y) = \sqrt{SX(x, y)^2 + SY(x, y)^2} \quad (6)$$

其中: x 和 y 分别表示水平和垂直方向上的梯度变化, 原始数据 $V(x, y)$ 表示雷达第 x 个方位角、第 y 个距离库的速度数据, $V(x+i, y+j)$ 表示梯度计算时在坐标 $(x+i, y+j)$ 处的数据, $SX(x, y)$ 和 $SY(x, y)$ 分别表示 (x, y) 处水平和垂直方向的梯度变化, $S(x, y)$ 表示水平和垂直合并后的梯度变化, 用于模糊线提取, 值越大, 说明该位置梯度变化越剧烈, 越可能是数据边缘。

sobelX和sobelY			垂直算子		
-1	0	1	-1	-2	-1
-2	0	2	0	0	0
-1	0	1	1	2	1

图 2 Sobel 水平和垂直算子结构

2.2 速度非模糊区判定

速度模糊线将径向速度数据划分为速度模糊区和非模糊区等多个区域, 从中选取非模糊区对速度模糊区进行订正。选取的非模糊区是否准确, 直接影响最终速度退模糊处理的准确性以及后续算法的处理效率^[21]。在无外源准确参考数据输入时, 采用模糊逻辑方法划分各个区域, 从区域面积、零速线分布、仰角等角度整体评估区域的非模糊特性, 将每个待检测区域的面积指数、零速线指数以及区域仰角指数之和确定为该区域的非模糊指数, 将满足非模糊指数条件的待检测区域确定为不

模糊区域, 每个指数从不同方面反映了区域与速度模糊之间的关系, 求和方式更好地衡量一个区域属于非模糊区的可能性。

1) 区域面积指数 I_s 和区域零速线指数 I_{v_0} :

最大不模糊速度和目标区域风速反映该区域速度测量的特性和背景风速特征, 当理论非模糊区占比小而实际区域面积占比大时, 说明该区域大概率是非模糊的, 反之通过两者比值衡量其属于非模糊区的程度, 从而确定区域面积指数。零速线反映区域内速度为零的分布特征, 零速线的分布和占比与雷达参数、目标区域特性相关, 计算并比较理论和实际零速线的占比, 衡量该区域速度分布的合理性, 若实际零速线占比大, 说明该区域的速度情况更符合非模糊的特征, 反之通过比值来体现其非模糊的程度, 从而确定区域零速度线指数。

对毫米波云雷达原始径向数据分区后, 在未出现速度“二次模糊”的情况下, 非模糊区域所占区域最大, 非模糊区出现明显的零速度线, 以区域面积所在比例和区域内零速线分别作为判定非模糊区的贡献因子, 二者计算方法分别为:

$$I_s = \frac{S_n}{S} \times \frac{90}{\arcsin\left(\frac{V_m}{\bar{V}}\right)} \quad (7)$$

$$I_{v_0} = \frac{S_{v_0}}{S_n} \times \frac{\arcsin\left(\frac{V_m}{\bar{V}}\right)}{\arcsin\left(\frac{V_0}{\bar{V}}\right)} \quad (8)$$

其中: S_n 表示目标区域所占面积, S 表示扫描区域总面积, S_{v_0} 表示区域内零速线所占面积, V_m 表示最大不模糊速度, \bar{V} 表示平均风速, V_0 表示零速线阈值。

2) 区域仰角指数 I_A :

高空大气以水平运动为主, 垂直运动较弱, 通常情况下垂直风速不会超过 2 m/s。当毫米波云雷达采用 RHI 扫描模式时, 天顶附近探测得到的径向速度以垂直风速为主, 水平风速分量贡献极小, RHI 模式下毫米波云雷达探测得到的径向速度零速线出现在雷达天顶区域, 并且由于风的垂直运动较弱, 该区域的径向风速一般不会超过雷达最大不模糊速度, 观测数据均位于非模糊区^[22]。雷达基于每个数据对应的仰角, 雷达基于每个数据对应的仰角, 确定待检测区域的平均仰角, 再基于角度比值与最优值的距离, 确定待检测区域的区域仰角指数, 区域仰角贡献指数 I_A 计算方法为:

$$I_A = 1 - \left| \frac{A_{\text{mean}}}{90} - 1 \right| \quad (9)$$

$$A_{\text{mean}} = \frac{(A_1 + A_2 + \dots + A_n)}{n} \quad (10)$$

其中: A_{mean} 为目标区域的雷达平均仰角, 即区域内每个速度数据的仰角平均值, A 表示雷达不同的仰角

值, n 表示雷达仰角数量。

2.3 速度模糊数据订正

非模糊区判定后将雷达原始径向速度数据划分为不同的区域, 从中选取最可能非模糊区 S_0 , 其他区域归入模糊区列表 SList, 将模糊区 S_n 与非模糊区 S_0 逐一对比, 并将订正后的模糊区域作为非模糊区并入 S_0 区域, 扩大非模糊区域的面积并将该模糊区域从模糊列表中删除, 逐一扩展完成所有区域的数据对比和订正, 实现速度的退模糊订正, 毫米波云雷达径向速度模糊区域的订正流程如图 3 所示。

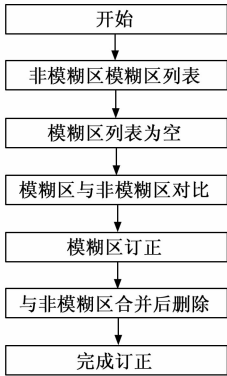


图 3 速度模糊区订正流程图

2.4 二次模糊检验

以 I 指数为标准能够在大部分情况下选取出真实的非模糊区, 但对于雷达 PPI 和 sPPI 的扫描模式, 若出现两次以上的速度模糊, I 指数识别方法会出现速度模糊区域的误判, 导致整个数据的订正结果出现偏差^[23]。因此, 在完成 PPI 和 sPPI 扫描模式的数据退模糊后, 进一步对数据进行二次模糊检验, 保证数据订正的准确性。

对初次订正结果 $V1$, 选取方位角镜像的两个径向的特定距离库的径向速度 $V1(azi, rad)$, $V1(azi + 180, rad)$, 计算其偏离指数 dif , 以其为参考开展毫米波云雷达径向速度数据的二次模糊订正, 得到最终订正结果 $V2$ 。若订正结果与真值一致, dif 接近 0; 对于出现多次速度模糊且订正偏差较大的情况, dif 则接近 ± 1 和 ± 2 。偏离指数和订正结果的计算方法为:

$$dif = [V1(azi, rad) + V1(azi + 180, rad)] / (4V_m) \quad (11)$$

$$V2 = V1 - 2 \times dif \times V_m \quad (12)$$

其中: $V1$ 为初次订正结果, azi 为所选取的方位角, 此方位角且镜像方位角上径向速度数据均为有效值, rad 为所选取距离库, 相对径向的该距离门上速度数据为有效值。

3 实验分析

利用速度退模糊算法对 180 组存在模糊现象的测试

数据进行分析验证, 完成测试数据的速度退模糊处理, 图 4 表示一次毫米波云雷达模糊线提取效果, 其中 (a) 为原始径向速度数据, (b) 为按 Sobel 算法处理得到的模糊线指数 $S(x, y)$, 速度模糊主要区域为雷达南部①区(方位角 200°)、南部②区(方位角 260°)以及部分零散模糊区③区, 其他区域为速度非模糊区域。通过模糊线指数获取 4 条速度模糊线, 其中 1 和 2 两条主要模糊线用以分隔非模糊区与①②两个主要模糊区, 3 和 4 两条次级模糊线用以分隔非模糊区与零散模糊区, 通过主次两个模糊区的处理完成雷达速度原始数据的模糊线提取及不同区域的划分。

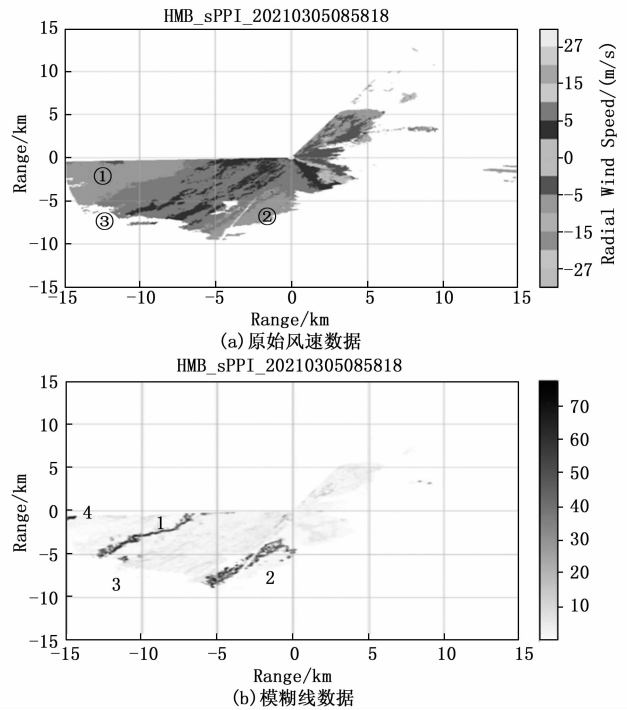


图 4 模糊线提取结果

图 5 表示雷达速度数据模糊的订正结果, 其中 (a) 为原始径向速度数据, 包括主回波区域和方位角 $30^\circ \sim 60^\circ$ 、 $92^\circ \sim 96^\circ$ 区域的零散回波和边缘回波, (b) 为订正后的速度数据, 通过数据订正实现两个主模糊区域和一个零散模糊区域的退模糊处理, 模糊区域非模糊化率为 100%, 识别准确率为 96%, 实现最大模糊速度 -15 m/s 的订正, 订正后相邻数据相关性为 0.93。由于地物杂波一般为固定目标物, 相对雷达的径向速度为零, 影响零速度线的识别和定位, 地物杂波区域易被误判为异常负值区, 处理速度模糊的同时滤除了孤立回波和边缘回波, 影响整体订正效果。

图 6 表示毫米波云雷达速度模糊数据的二次处理, 其中 (a) 为原始径向速度数据, 方位角 $100^\circ \sim 160^\circ$ 为非模糊区, $30^\circ \sim 100^\circ$ 为大面积连续的速度模糊区域, $160^\circ \sim 260^\circ$ 区域为包含零速度和速度小值的为复杂速度

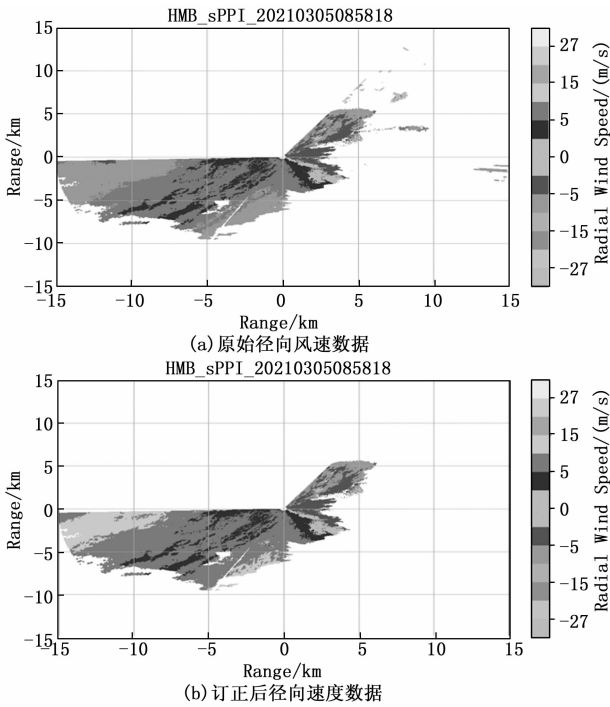


图 5 速度模糊区订正

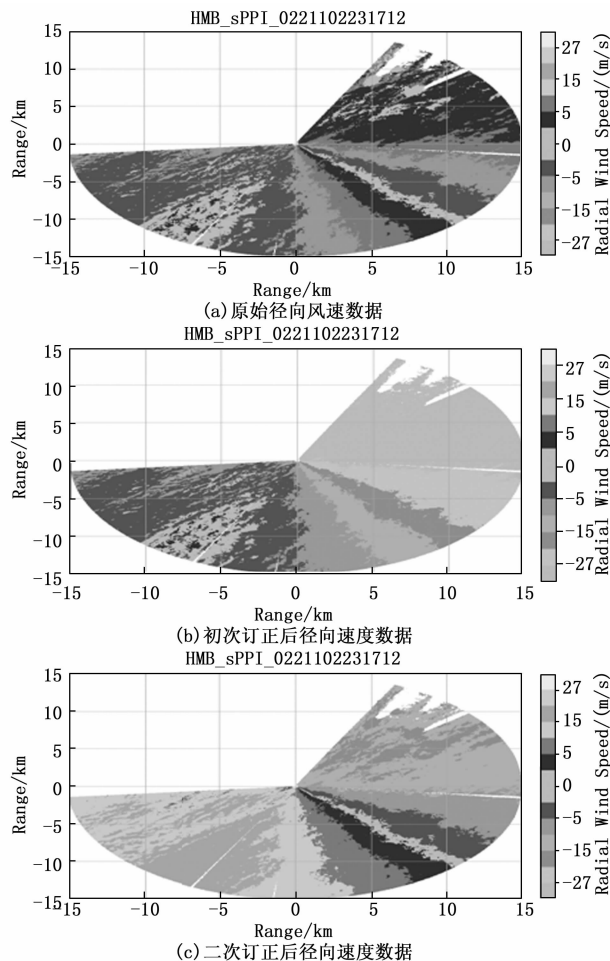


图 6 二次订正速度模糊

模糊区域; 图 (b) 表示模糊订正处理后的数据, 将 $30^{\circ} \sim 100^{\circ}$ 区域识别为非模糊区, 没有将 $160^{\circ} \sim 260^{\circ}$ 区域识别为模糊区, 而将 $100^{\circ} \sim 160^{\circ}$ 非模糊区也识别为模糊区域, 同时由于 $30^{\circ} \sim 100^{\circ}$ 区域内部速度的连续变化, 区域与区域之间存在速度折叠现象, 导致数据订正出现的偏离, 一次订正效果不理想, 需要对数据进行二次退模糊处理; 图 (c) 表示二次模糊检验订正后的数据, 首先修正 $100^{\circ} \sim 160^{\circ}$ 非模糊区的误判, 同时将 $160^{\circ} \sim 260^{\circ}$ 识别为模糊区域, 模糊区域识别准确率和误判修正成功率均为 100%, 同时将一次订正中出现偏差的数据订正为接近真实风场变化的数据, 二次订正的整体准确率为 95%, 订正后相邻数据相关性为 0.94, 其中 $30^{\circ} \sim 100^{\circ}$ 连续模糊区域的订正准确率为 98%, 仅在模糊区域和非模糊区域边缘存在部分订正偏差, $160^{\circ} \sim 260^{\circ}$ 区域的订正准确率为 89%, 对 $195^{\circ} \sim 245^{\circ}$ 复杂风场的区域存在误判和订正偏差, 订正准确率为 78%, 订正后的数据将零散的零速度区和速度小值区订正为连续的正速度大值区域, 真实风场的细节特征存在一定的偏差。

图 7 表示雷达 RHI 扫描模式下速度模糊数据的处理效果, 原始数据中除非模糊区域外, 还存在近距离低层径向线和附近的零散速度模糊区域, 以及 500 m 和 2 000 m 高度附近的连续速度模糊区。通过速度退模糊算法进行速度退模糊处理, 模糊区域识别准确率和非模糊化率为 100%, 订正后相邻数据相关性为 0.98, 原始数据中速度模糊区的平均速度为 4.8 m/s, 订正后为 -11.3 m/s。由于该层仰角上模糊区域内分布的零散非模糊区域影响零速度线区域的定位和大小, 将 2 000 m 高度区域中 5 m/s 速度模糊区域订正为 -15 m/s, 影响

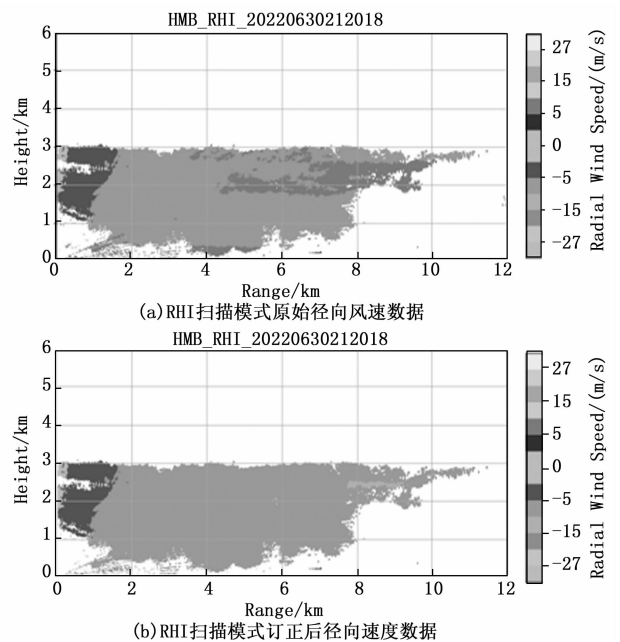


图 7 RHI 扫描模式下数据退模糊

速度退模糊效果。

4 结束语

径向速度退模糊是毫米波云雷达数据处理的关键环节,其精度直接影响雷达数据解析和气象产品反演的可靠性。通过消除速度折叠误差,提升雷达观测数据质量,为短时临近天气预报、云物理过程研究及气候模型优化提供坚实的数据基础。针对毫米波云雷达 PPI、sPPI 和 RHI 等扫描模式中存在的径向速度模糊,基于 Sobel 算子的退模糊算法,利用梯度算子对速度场数据进行边缘检测,实现速度模糊区域的高精度识别,通过模糊边界定位算法确定速度模糊线空间分布,并引入二次模糊校验机制以降低误判风险。通过分析雷达多种扫描模式实测数据,速度退模糊整体准确率达 90% 以上,订正后相邻数据点相关性超过 0.93,提高了复杂气象条件下径向速度场的观测精度。同时发现算法对雷达基数据中二次回波、地物杂波等数据的处理效果仍有待提升,后续研究将结合二次回波与地物杂波的特征分析,探索多算法融合策略,进一步优化毫米波云雷达在复杂环境下的速度退模糊性能,持续增强雷达数据及产品的准确性。

参考文献:

- [1] WANG J H, ROSSOW W B. Effects of cloud vertical structure on atmospheric circulation in the GISS GCM [J]. *Climate*, 1998, 11 (11): 3010 - 3029.
- [2] WALISER D E, J F LI, L'ECUYER T S, et al. The impact of precipitating ice and snow on the radiation balance in global climate models [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38 (6).
- [3] SHENGJIE NIU, CHUANONG LU, HUAYING YU, et al. Fog research in china; an overview [J]. *Adv Atmos Sci*, 2010, 27 (3): 639 - 662.
- [4] GULTEPE I, TARDIF R, MICHAELIDES S C, et al. Fog research: a review of past achievements and future perspectives [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2007, 164 (6 - 7): 1121 - 1159.
- [5] ZIHUA LI, JIANPING HUANG, YUSHENG HUANG, et al. Study on the physical process of winter valley fog in xishuangbanna region [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1999, 13 (4): 494 - 508.
- [6] GRSDORF U, LEHMANN V, BAUER-PFUNDSTEIN M, et al. A 35 GHz polarimetric doppler radar for long-term observations of cloud parameters-description of system and data processing [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2015, 32 (4): 675 - 690.
- [7] 马宁堃, 刘黎平, 郑佳锋. 利用 Ka 波段毫米波雷达功率谱反演云降水大气垂直速度和雨滴谱分布研究 [J]. *高原气象*, 2019, 38 (2): 325 - 339.
- [8] 何平, 刘晓阳. 多普勒天气雷达退速度模糊的 tprf 方法: CN 201010270482 [P]. [2025 - 05 - 27].
- [9] 梁海河, 张培昌, 葛润生. 多普勒天气雷达风场退模糊方法的研究 [J]. *应用气象学报*, 2002, 13 (5): 591 - 599.
- [10] 刘晓阳, 齐琳琳, 何宏让, 等. 用折叠跟踪算法退除多普勒速度折叠 [J]. *南京气象学院学报*, 1992, 5 (4): 493 - 499.
- [11] 蔡亲波, 颜琼丹. 二维多路多普勒雷达风场自动退模糊算法应用研究 [J]. *气象科学*, 2009, 29 (5): 625 - 632.
- [12] 万霞, 徐桂荣, 王斌等. 毫米波云雷达 THI 退速度模糊方法应用效果检验 [C] //中国气象学会. 第 33 届中国气象学会年会 S18 雷达探测新技术与应用. 2016: 283 - 284.
- [13] 曾正茂, 曾金全, 黄新洲, 等. Ka 波段云雷达速度模糊质量控制及对云探测影响的评估 [J]. *国外电子测量技术*, 2022, 41 (5): 31 - 36.
- [14] 刘黎平. 毫米波云雷达观测和反演云降水微物理及动力参数方法研究进展 [J]. *暴雨灾害*, 2021, 40 (3): 231 - 242.
- [15] ZHU Y, QIU Y, LU C. Millimeter wave radar observation of hydrometeor distribution characteristics of cloud in summer in Nagqu, Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Meteor. Mon*, 2019, 45 (7): 945 - 957.
- [16] 朱毅, 许波, 费松, 等. 激光雷达数据质量控制研究 [J]. *气象科学*, 2018, 38 (5): 692 - 698.
- [17] ZHANG J, WANG S. An automated 2D multipass doppler radar velocity dealiasing scheme [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2006, 23 (9): 1239.
- [18] 郑倩, 郑有飞, 王立稳, 等. 京津冀地区夏季降水冰云和非降水冰云特征对比分析 [J]. *气候与环境研究*, 2020, 25 (1): 77 - 89.
- [19] 韩美, 高珊, 曾瑾瑜, 等. 台湾海峡西岸海雾研究现状与未来发展方向 [J]. *气象科技*, 2016, 44 (6): 928 - 936.
- [20] LIU LIPING, ZHENG JIAFENG. Algorithms for doppler spectral density data quality control and merging for the Ka-band solid-state transmitter cloud radar [J]. *Remote Sens*, 2019, 11 (2): 123 - 135.
- [21] 靳笑晗, 汪岳峰, 竹孝鹏, 等. 最大似法在多普勒激光测风雷达中的应用研究 [J]. *光学仪器*, 2012 (5): 32 - 37.
- [22] 王春晖, 李彦超, 徐博, 等. 激光测风雷达速度方位显示反演中数据质量的控制方法与仿真 [J]. *中国激光*, 2008, 35 (4): 515 - 518.
- [23] 韩颂雨, 刘永生, 骆阳, 等. 适用 S 波段多普勒天气雷达的径向速度自动退模糊方法 [J]. *气象学报*, 2022, 80 (5): 791 - 805.