

文章编号: 2096-1618(2024)06-0676-06

相控阵雷达的数据质量控制及联合风场反演研究

李南浔¹, 刘艳², 陆韵国³, 全晶¹, 王海江¹

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610025; 2. 成都市气象局, 四川 成都 611130; 3. 中国国际航空股份有限公司运控中心, 北京 100621)

摘要: 为有效增强对大气风场观测的准确性, 基于多部相控阵天气雷达构建的雷达区域观测系统反演空间三维风场。研究了基于多轮退模糊的相控阵天气雷达径向速度的质量控制, 基于质控后的径向速度和三维变分方法进行了三维风场反演。实验结果表明, 二维多途径速度退模糊算法能很好地处理速度模糊的现象, 纠正模糊的径向速度数据, 三维变分方法提高了垂直风速反演的准确度。相控阵雷达时间和空间分辨率高, 用其探测的数据反演风场不仅提高了风场反演的准确性和可靠性, 为深入理解风场的空间结构和动态变化提供了有力的工具, 且在中小尺度灾害性天气的监测分析及高准确率预报中起到关键作用。

关键词: 相控阵雷达; 联合观测; 三维风场; 质量控制

中图分类号: TN957

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2024.06.005

0 引言

近年来, 中国气象雷达组网和业务运行持续优化完善, 对台风、暴雨、冰雹等灾害性天气的监测预警作用愈发重要^[1-2]。多普勒雷达不仅可测量回波强度, 还能精准测定降水目标物的径向速度和速度谱宽, 实现数据降重, 提高预警准确性, 从而提供更全面和精确的气象数据。经过双偏振升级改造, 新一代天气雷达提升了探测能力, 可探测到差分反射率因子、差分相移等偏振参数^[3]。与传统的雷达技术相比, 相控阵天气雷达在保证雷达资料质量的同时, 提升了扫描速度。它采用相位控制扫描方式, 通过调整波束的指向和强度, 实现更灵活和高效的扫描过程。这使相控阵天气雷达能在更短的时间内完成对整个天气系统的扫描, 大大提高数据的获取速度和处理效率。此外, 相控阵天气雷达还具备较高的数据准确性和稳定性。由于采用了先进的信号处理技术和算法, 它能有效减少因天线转动而产生的雷达资料在方位上的误差, 确保数据的真实性和可靠性^[4-6]。为进一步提升中国气象监测预警的能力, 积极探索相控阵天气雷达的应用, 基于相控阵雷达的快速和精细化探测更好地应对各种复杂多变的天气现象, 为生产生活提供更加可靠的气象预警服务。本文研究基于多部相控阵雷达联合观测进行风

场的反演的问题, 尤其是通过严格的径向速度退模糊和三维变分方法来提高风场反演准确度, 取得较好的三维风场反演效果。

1 相控阵天气雷达站点参数

3部相控阵天气雷达波长为X波段, 扫描自低仰角到高仰角, 再换到下一方位角上继续扫描, 扫描数据采用RHI方式存储, 径向数据字节长度固定为16104字节, 距离库长30 m, 最大距离库数2000。雷达站点的地理位置分布如图1, 仰角范围如表1。

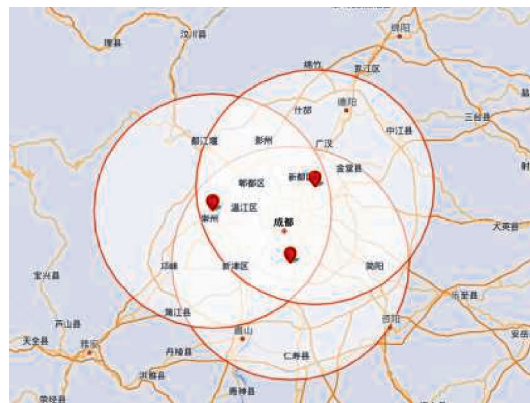


图1 组网位置分布图

表1 仰角探测范围

仰角层数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	...
仰角/°	0.90	2.70	4.50	6.30	8.09	9.89	11.69	13.49	15.29	17.09	18.89	...

2 数据质量控制

二维多途径速度退模糊算法分别从径向和方位角

收稿日期: 2024-05-21

基金项目: 四川省科技厅资助项目(2023YFG0170)

通信作者: 刘艳. E-mail: 6246573@qq.com

方向对某一仰角层的数据进行多轮操作的退模糊^[7-8]。在输入的一个仰角层上的径向速度数据中搜索弱风区,在弱风区内选择径向和距离库作为参考对象,提高了算法的稳定性。选择多条径向、多个距离库同时作为参考对象,极大提高了模糊速度判断的正确率。分别从顺时针和逆时针方向对数据进行处理,每个方向上的工作角度为 180° ,将处理过程中误差扩散限制在 180° 范围内。

2.1 初始径向退模糊

(1) 检查径向上各个相邻距离库之间的速度变化,通过计算相邻距离库之间的速度差,并与参数 λ_1 (取0.8)比较,可排除速度变化过大的径向,有助于确保所选径向在速度上是相对稳定的。

$$|V_{i+1} - V_i| < \lambda_1 V_N \quad (1)$$

(2) 径向上满足一定条件的有效距离库的速度平均值,平均值与参数(取0.3)比较,以进一步筛选出那些速度平均值较小的径向,有助于选择位于弱风区或低风速区域的径向。

$$V_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (2)$$

(3) 在相邻径向间速度符号的变化时,若发现任意2条相邻径向间,其前后2条径向的有效距离库平均速度的正负性相同,但相邻径向间速度符号却存在差异,则应当选取中间2条径向中有效距离库数目较多者作为初始径向。2种符号相异情况如图2所示。

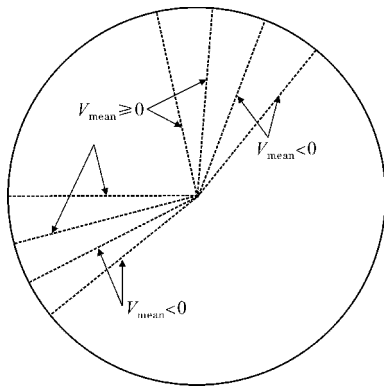


图2 判断初始参考径向图

在确定初始径向后,将初始径向的 V_{mean} 作为参考值,将参考值记为 V_R 。按 $|V_i - V_R| < \lambda_2 V_N$ 对初始径向上的所有距离库的值进行订正, λ_2 的缺省值为0.8。对初始径向处理后,将该径向作为参考径向对相邻的2条径向进行模糊操作。利用方位角方向上的连续性约束,对于被处理的每一个距离库,其参考对象为初始方向上相同距离处的距离库。如果比较结果满足上述不等式,则将当前距离标记为1,否则标记为0。至此,已经处理的径向,将用于下一个模块中。

2.2 第一轮退模糊

该模块利用已处理好的3条径向同时作为参考径向,按照顺时针和逆顺针对其余的径向进行处理,每个方向的跨度为 180° ,如图3(a)所示。这种双向处理方式将误差传播限制在 180° 内。对于一条径向而言,它

将会被两轮不同方向的模糊性检查,即方位角方向和径向方向。

在方位角方向上,径向上的距离库被逐一检查,其参考对象为与当前距离库径向距离相同的,位于3条参考径向上的3个距离库的平均值。3条径向上的距离库需要满足:均经过退模糊检查或模糊数据纠正;任意两个相邻距离库之间没有大的突变,满足式1。如果3个参考距离库不满足这些条件,则将当前距离库标记为0。如果当前距离库与参考值 V_R 之间的差距大于 $\lambda_1 V_N$,则将纠正当前距离库的值并标记为1。

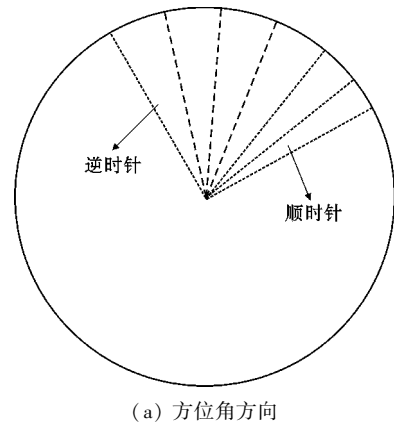
在径向方向上扫描时,参考下述条件选择最优的距离库:

(1) 远离回波边缘。在该参考距离库的两端有至少10个有效的距离库必须为已经处理好的距离库(即已被标志为1)。

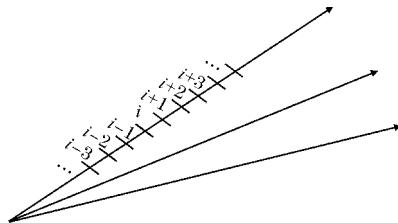
(2) 其两端相邻的2个距离库也被标志为1。并且这5个距离库之间满足式1。

(3) 径向距离与之相同的前面3条径向上的距离库已被标志为1。

将挑选的距离库作为初始距离库,与相邻两个已处理点的平均值赋给 V_R 。从初始距离库开始,沿着朝向雷达和远离雷达方向分别进行退模糊处理,如图3(b)所示。



(a) 方位角方向



(b) 径向方向

图3 退模糊方向示意图

2.3 第二轮退模糊

该模块专注于处理在第一轮操作中未被处理的点。通过逐渐放宽搜寻范围,该模块能更全面地考虑数据的空间分布特征,确保所有被标记为0的点都能得到正确处理。其大体步骤与第一轮类似,但在参考对象的选择上扩大了范围,将当前径向前面的3个径向作参考更改为4个或5个。这种扩展增加了参考数据的数量,提高了退模糊处理的准确性。同时,通过在方

位角和径向方向上逐渐放宽搜寻范围,模块能更好地捕捉和处理数据中的模糊区域,直至所有的被标记为0的点均被正确处理。

2.4 退模糊结果分析

选取2022年05月13日位于成都市3个区域相

控阵天气雷达径向速度数据。在对其进行速度退模糊处理后,图4~5是模糊前后直观对比,经过退模糊算法处理,确保数据准确性和可靠性,为后续的风场分析和应用提供坚实的基础。

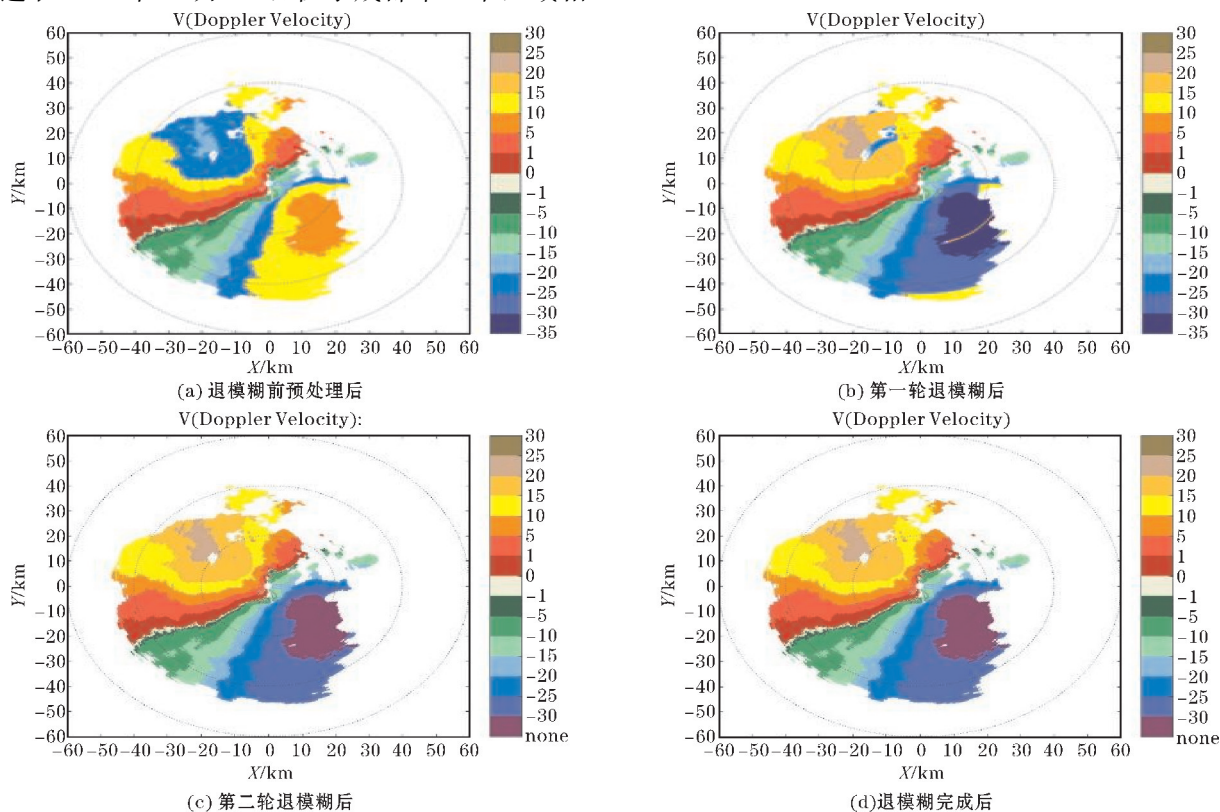


图4 第一部雷达速度退模糊过程实例

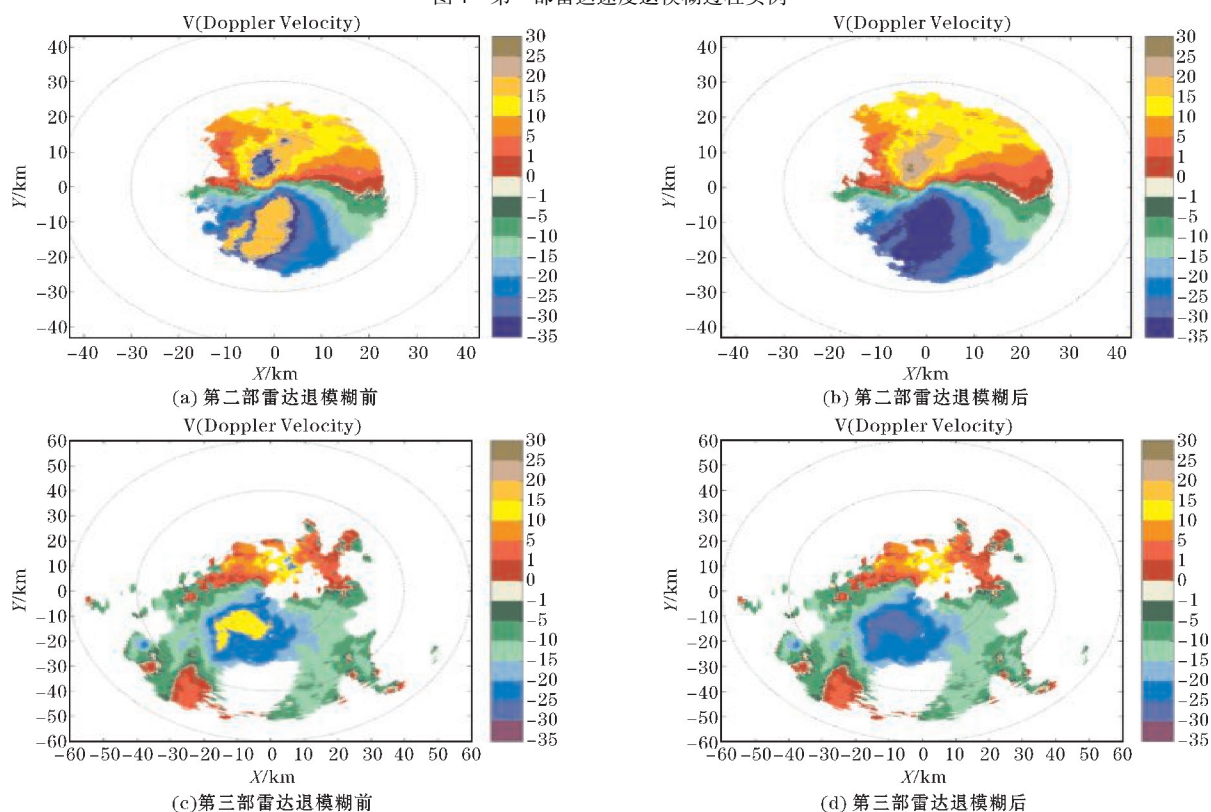


图5 第二部和第三部雷达速度退模糊前后效果

3 三维风场反演

3.1 风场反演算法^[9-11]

步骤1:将雷达极坐标转换成直角坐标,构建统一的直角坐标系,建立一定分辨率的网格点,采用自适应插值法得到3部雷达分别在网格点上的径向风速值。

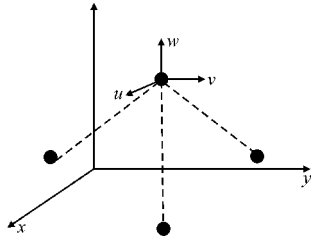


图6 风场矢量图

$$\begin{aligned} u &= \frac{(yz_3 - y_3z)(R_2v_2 - R_1v_1) + (y_2z - yz_2)(R_3v_3 - R_1v_1) + R_1v_1(y_2z_3 - y_3z_2)}{xy_2z_3 - xy_3z_2 - x_2yz_3 + x_2y_3z - x_3y_2z} \\ v &= \frac{(x_3z - xz_3)(R_2v_2 - R_1v_1) + (xz_2 - x_2z)(R_3v_3 - R_1v_1) + R_1v_1(x_3z_2 - x_2z_3)}{xy_2z_3 - xy_3z_2 - x_2yz_3 + x_2y_3z + x_3yz_2 - x_3y_2z} \\ w &= \frac{(xy_3 - x_3y)(R_2v_2 - R_1v_1) + (x_2y - xy_2)(R_3v_3 - R_1v_1) + R_1v_1(x_2y_3 - x_3y_2)}{xy_2z_3 - xy_3z_2 - x_2yz_3 + x_2y_3z + x_3yz_2 - x_3y_2z} - V_i \end{aligned} \quad (5)$$

当探测目标的雷达数量3部以上时,就可用上述反演风场法,由于存在测量误差,在低仰角时反演的垂直风速误差较大,因此需要用三维变分方法进行校正^[12]。

三维变分法通过建立包含多种损失项的损失函数 J 。将各个损失项表示成最小二乘的形式,通过最小化损失函数 J 求得风场。损失函数定义为在一系列限制条件下的目标区域内观测值与分析值之间差值的平方求和。根据不同的实验条件和需求,损失函数的各项限制条件可自行调整。如引入背景风限制,涡度方程等。将每一项限制条件作为弱约束,并添加各个限制项的权重系数,以调节各项所占的比重。损失函数 J 对各个未知量求导以得到梯度信息。因此损失函数 J 必须是可微的。将损失函数定义为

$$J = J_0 + J_D + J_s \quad (6)$$

其中观测项限制 J_0 表示雷达观测的径向数据值 V_{rob} 与分析值 V_r 之间的差距:

$$J_0 = \sum_{m,n} \lambda_{m,n} (V_{r,m,n}^{m,n} - V_{rob,m,n}^{m,n})^2 \quad (7)$$

损失函数的第二项 J_D 为非弹性连续性方程限制以及最后一项连续项 J_s 分别表示为

$$J_D = \sum_{i,j,k} \lambda_D \left(\frac{\partial \bar{\rho} u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\rho} v}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\rho} w}{\partial z} \right) \quad (8)$$

$$J_s = \sum_{i,j,k} \lambda_{us} (\nabla^2 u)^2 + \sum_{i,j,k} \lambda_{vs} (\nabla^2 v)^2 + \sum_{i,j,k} \lambda_{ws} (\nabla^2 w)^2 \quad (9)$$

其中: $\bar{\rho}$ 为在水平面上的平均空气密度, $\lambda_{m,n}$ 、 λ_D 、 λ_{us} 、 λ_{vs} 、 λ_{ws} 为各自的系数。设置 u, v, w 在边界条件处满足:

$$\frac{\partial J}{\partial u} = \frac{\partial J}{\partial v} = \frac{\partial J}{\partial w} = 0 \quad (10)$$

步骤2:步骤1设立的笛卡尔坐标系中,对于探测范围内的任意一点,其真实风速可以通过一系列数学表达来精确描述。具体来说,将风速分解为 u, v, w 3个分量分别代表风矢量在 x, y, z 3个方向上的投影。

$$\begin{aligned} V_{r1} &= \frac{1}{R_1} [xu + yv + (z - z_1)(w + V_i)] \\ V_{r2} &= \frac{1}{R_2} [(x - x_2)u + (y - y_2)v + (z - z_2)(w + V_i)] \end{aligned} \quad (3)$$

$$V_{r3} = \frac{1}{R_3} [(x - x_3)u + (y - y_3)v + (z - z_3)(w + V_i)]$$

其中, R_1, R_2, R_3 代表分析点和雷达站的距离:

$$\begin{aligned} R_1 &= \sqrt{x^2 + y^2 + (z - z_1)^2} \\ R_2 &= \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

$$R_3 = \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2}$$

可以推导出风场各分量的表达式:

则可得到最优的 u, v, w 值。

3.2 风场反演结果

图7是成都3个站点在2022年5月13日某时刻X波段相控阵雷达所形成的雷达组网组合探测区域内风场反演图,选择高度10 km, 30 km, 50 km这3层的单独显示。从图7(a)看出随着高度的逐渐递增,风场特征也出现变化。由于低空环境对垂直风速的影响较大,特意避开低层次的风场反演数据。图7(b)~(d)是从10 km开始,每增加20 km所反演出的风场情况。可以清晰地看到,随着层数的增加,风速的走向并未发生明显的改变,但风速的大小却呈现出逐渐增加的趋势。整体上,风向依然保持着东北风的走向,并且这种一致性随着高度的增加而逐渐增强。

3.3 风场正确性验证

图8中黑点表示相控阵雷达站点,中间为SA雷达站点,将以上结果作为参照,对风场反演得到的空间上的3个分量进行处理,将得到的 u, v, w 3个方向的值,投影到SA雷达径向速度方向上选取第4层的径向速度,然后画出风场投影后的速度PPI图进行对比,验证风场反演的准确性。值得注意得是SA雷达径向速度表示是在极坐标下,而三维风场用的坐标已经改成直角坐标,风场范围-40 ~ 40 km。因为投影的风场分量数据量庞大,且反演风场只用了共同探测范围内的数据进行,为确保风场的完整与可观性,共同探测范围外的风场用插值外推数据得到,具有一定的误差。

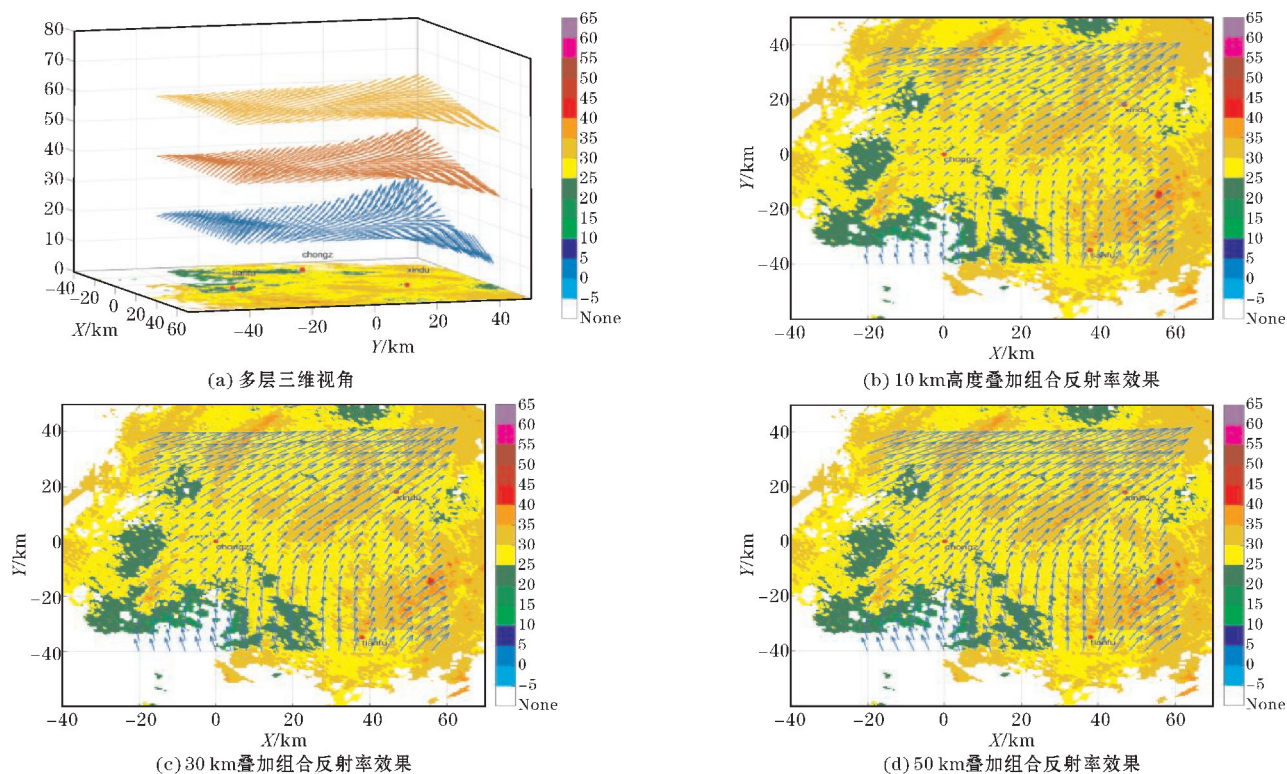


图7 三维风场与组合反射率叠加效果图

故不对所有计算后的数据与 SA 雷达径向速度数据进行误差分析,而是选择共同探测范围内的风场数据,这样避免因外推插值而产生的误差。在对比时只观察共同范围内的速度大小变化趋势是否一致,且计算均方误差和绝对误差来进行定量判断体现。因为两种雷达的空间分辨率相差很大,所以取 8 个网格点的平均值和 SA 雷达的一个仰角方向做投影计算。图 8 是投影所得到的速度图,共 3 组,黑色标志的站点地理位置相

同,可看到共同范围内风场分量的投影图与 SA 径向速度图变化趋势相同,存在一定的误差,速度变化趋势相同,验证了风场方向变化的正确性。计算风场分量投影与 SA 雷达的径向速度的绝对误差和均方误差,误差均在 1 m/s 左右(表 2),此 6 个例子很好的支撑了本文研究的风场反演准确性与创新性,为以后的风场反演研究提供参考。

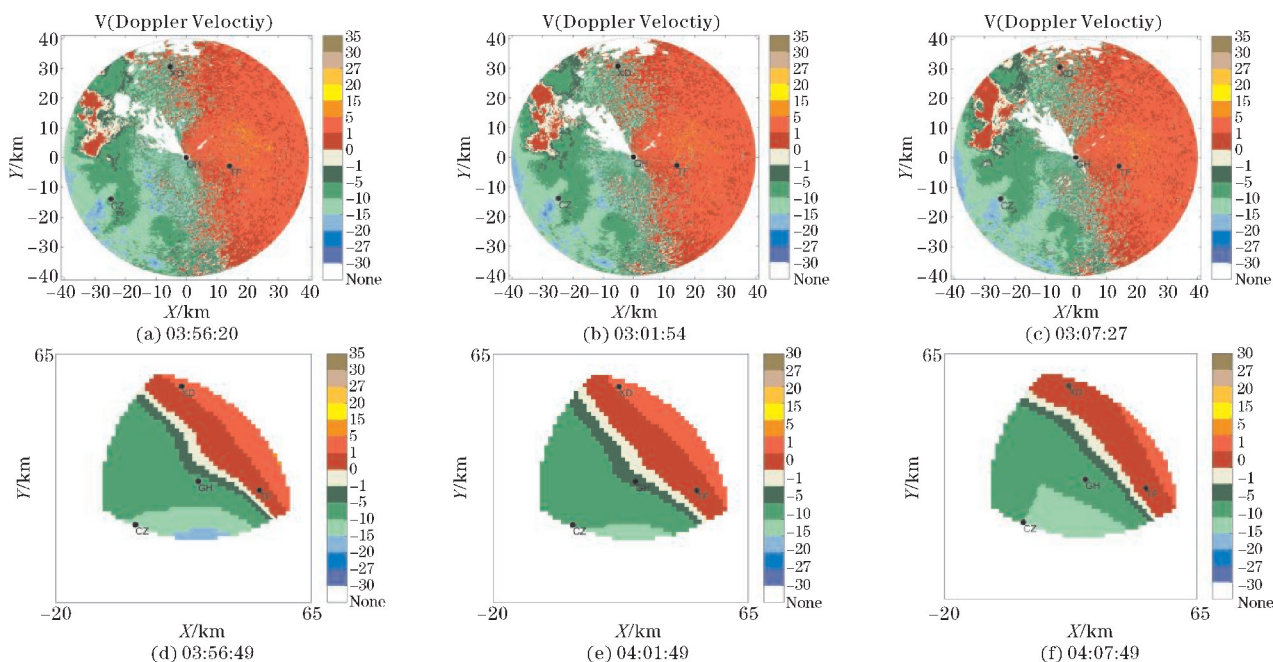


图8 SA 雷达连续时刻投影图及连续时刻三维风场分量投影 PPI 图

表 2 径向风速误差

时刻	径向风速	
	平均绝对误差/(m/s)	均方根误差
03:56:49	0.87	0.85
04:01:49	0.96	0.94
04:07:49	1.06	0.98

4 结束语

基于成都相控阵天气雷达组网数据质量控制速度退模糊后的反演三维风场提高了风场反演的准确性和可靠性,为深入理解风场的空间结构和动态变化提供了有力的工具。

基于二维多途径速度退模糊算法在解决速度模糊、对抗噪声干扰以及纠正模糊径向速度数据方面表现出色,具有良好的可操作性和实践性。二维多路径速度退模糊算法作为一种针对雷达数据中速度模糊现象的有效处理方法,通过结合径向和方位角方向的多次循环操作,实现了对某一仰角层数据的全面退模糊处理,有效限制了误差的扩散。

利用 X 波段相控阵天气雷达进行风场反演具有较高的准确性。由于当时的基础数据并不包含极端天气情况,因此无法全面验证其在极端条件下的表现。后续研究可进一步拓展,以更全面地评估该方法的效能。综上,本文通过对相控阵天气雷达数据的深入研究,实现了风场产品的反演,这些研究成果对于提高风场反演的准确性和可靠性具有重要意义,为气象预报和灾害监测等领域提供了有力的技术支持。

致谢:感谢成都市气象局课题(2024-1(28))对本文的资助

参考文献:

[1] 段艺萍,刘寿东,刘黎平,等. 新一代天气雷达三

维组网产品在人工防雹的应用研究[C]. 中国气象学会第 32 届中国气象学会年会 S11 人工影响天气研究与业务应用. 2015:16.

[2] 孙敏. 多普勒天气雷达组网联合观测与数据融合[J]. 成都信息工程大学学报,2019,34(5): 475-481.

[3] Bringi V N, Chandrasekar V. Polarimetric Doppler weather radar[M]. Cambridge University Press,2001.

[4] 刘黎平,吴林林,吴罡,等. X 波段相控阵天气雷达对流过程观测外场试验及初步结果分析[J]. 大气科学,214,38(6):1079-1094.

[5] 张志强,刘黎平. S 波段相控阵天气雷达与新一代天气雷达探测云回波强度及结构误差的模拟分析[J]. 气象学报,2011,69(4):729-735.

[6] 张志强. 相控阵天气雷达强度探测与评估方法研究[D]. 北京:中国气象科学研究院,2011.

[7] Ray P S, Ziegler C. De-Aliasing First-Moment Doppler Estimates[J]. Journal of Applied Meteorology,1977,16(5):563-564.

[8] Gong J, Wang L, Xu Q. A Three-Step Dealiasing Method for Doppler Velocity Data Quality Control [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2003,20(12):1738.

[9] Ray P S, Wagner K K, Johnson K W, et al. Triple-Doppler Observations of a Convective Storm[J]. Journal of Applied Meteorology,1978,17(8):1201-1212.

[10] 周海光,张沛源. 笛卡儿坐标系的双多普勒天气雷达三维风场反演技术[J]. 气象学报 2002(5):585-593.

[11] 周海光,王玉彬. 多部多普勒雷达同步探测三维风场反演系统[J]. 气象,2002,28(9):7-11.

[12] 王艳春,王红艳,刘黎平. 三维变分方法反演风场的效果检验[J]. 高原气象,2016,35(4): 1087-1101.

Research on Data Quality Control and Joint Wind Field Retrieval of Phased Array Radar

LI Nanxun¹, LIU Yan², LU Yunguo³, QUAN Jing¹, WANG Haijiang¹

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Chengdu Meteorological Service, Chengdu 611130, China; 3. Operation Control Center of Air China, Beijing 100621, China)

Abstract:To effectively enhance the observation accuracy of atmospheric wind fields, this paper retrieved the three-dimensional wind field based on the regional detection system constructed by multiple phased array weather radars. Firstly, this article studies the quality control of radial velocity of phased array weather radars by repeated de-ambiguity on the radial velocity. after quality control. Then the retrieval of the three-dimensional wind field was conducted with the radial velocities and the three-dimensional variational method. The experiment results showed that the two-dimensional multi-channel velocity de-ambiguity algorithm can effectively handle the phenomenon of velocity ambiguity, and correct the ambiguous radial velocity data. The three-dimensional variational method improved the accuracy of the vertical wind speed. The phased array radar has high temporal and spatial resolution, it not only improves the accuracy and reliability of wind field retrieval, and helps to deeply understand the spatial structure and dynamic changes of wind fields, but also plays an important role in monitoring and analyzing meso-and micro-scale catastrophic weather, as well as high accuracy forecasting.

Keywords:phased array radar; joint observation; 3D wind; quality control