

文章编号: 2096-1618(2023)06-0630-07

X波段天气雷达组网协同观测试验结果分析

刘 杨^{1,2}, 杨 玲^{1,2}, 徐梓欣^{1,2}, 李学华^{1,2}

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610225)

摘要:2016–2021年成都和北京开展了X波段天气雷达组网观测实验,旨在检验组网观测策略对中小尺度天气过程演变的观测能力和对业务S波段雷达的补充作用。介绍了雷达性能指标、观测模式与风场反演算法,并通过在成都与北京选择天气个例,对X波段雷达组网资料与S波段业务雷达资料进行对比分析。在短时强降水个例中,该组网策略观测到强对流单体初生6分钟内过程面积与强度逐渐增大的过程,能有效提升快速演变的中小尺度对流天气的探测能力,弥补S波段雷达的时间上的探测盲区。在冰雹过程中,通过组网雷达的反演风场可以反映此次天气过程中的强对流中心不同高度的风场特征是中层高度气流辐合压迫气流向上运动,到高层向四周散开形成辐散的结构。同时,S波段雷达在同一时刻观测的径向速度场和反演风场相互印证,但通过单部S波段雷达探测会丢失部分风场随高度变化的信息。通过雷达组网和风场反演算法得到的流场结构符合天气学原理,与S波段雷达探测到的径向速度结构一致,能够更精细地展现对流天气的动力结构。在冰雹过程中的智能RHI扫描结果显示强回波中心位置的中低层辐合和高层辐散的结构,体现了智能RHI探测算法的有效性。

关键词:雷达组网;X波段天气雷达;三维风场反演;中小尺度对流天气

中图分类号:TN959.4

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2023.06.002

0 引言

在现代气象观测中,天气雷达网如新一代多普勒天气雷达CINRAD能实时获取降水天气的雷达反射率、径向速度等数据。这些信息在灾害性天气的分析与预警中是不可或缺的部分^[1-4]。许多灾害性天气如冰雹、下击暴流、大风等都属于中小尺度强对流天气,而美国的WSR-88D和中国的CINRAD远距离探测中由于体扫模式的原因对中小尺度强对流天气的探测有一定局限性^[5]。2006年美国CASA项目提出了一种多雷达协同自适应观测模式,利用多部低成本的小功率短程X波段天气雷达组网在俄克拉荷马州开展了观测实验,目的是获取重点区域的精细化扫描数据,从而弥补大雷达的探测盲区。实验表明,此模式能提升天气雷达对于中小尺度强对流天气的识别能力^[6-9]。2013年美国在德克萨斯州建立了8部X波段天气雷达组成的雷达网络,获取了探测范围内的高时空分辨率数据,并利用组网探测数据实现三维风场反演与降水估计^[10-12]。2013年,中国科学院大气物理研究所与南京恩瑞特公司合作,在南京周边利用4部X波段天气雷达建立了中国第一个X波段天气雷达网络,建立了一个自动判断重点区域并对其重点观测的扫描模式^[13]。2016年,成都信息工程大学在兼顾对成都平原强对流天气的探测能力和获取高时空分辨率数据的

需求下,利用双流、龙泉和资阳的3部X波段天气雷达进行组网观测,优化其协同扫描模式,制定了一种快速体扫(5个仰角)+智能RHI扫描的组网扫描策略,提出了基于神经网络的强对流识别算法和基于无监督聚类算法的强回波识别方法^[14-16],以获取高时空分辨率、低时差、少盲区的观测资料。为进一步验证组网算法的有效性,对位于北京顺义、怀柔、密云、通州、昌平、门头沟和房山的7部双偏振雷达进行组网观测实验,由于北京对流风暴发展高度普遍较高,对应快速体扫仰角数量增加至9个。

针对协同扫描策略中快速体扫、智能RHI扫描和可以进行对时差较低的多部雷达进行风场反演的特点,本文以S波段雷达资料做参考,通过短时强降水和冰雹个例分析,讨论了协同扫描策略在天气过程观测中的具体作用。

1 雷达组网与相关算法介绍

1.1 雷达布局

成都雷达组网如图1(a)所示,3部雷达分别位于成都双流(103°59.31'E,30°34.97'N),成都龙泉(104°18.10'E,30°36.47'N),资阳雁江(104°36.01'E,30°7.99'N)。3部雷达的相对距离均在X波段雷达有效探测范围内,满足共同扫描区域内探测数据的可靠性,3部雷达共同扫描区域占总覆盖区域的32%。

北京雷达组网图如图 1(b)所示,7 部雷达分别位于顺义(116°36.88'E,40°7.60'N),怀柔(116°38.99'E,40°43.54'N),密云(116°47.65'E,40°21.37'N),通州(116°45.08'E,39°51.19'N),昌平(116°20.39'E,40°10.40'N),门头沟(115°44.67'E,39°55.66'N),房山

(116°11.00'E,39°40.61'N),其覆盖区域如图 1(c)所示,绿色代表单部雷达扫描区域,红色代表 2 部以上雷达共同观测区域,总覆盖面积约为45194.65 km²,其中共同扫描区域约为29943 km²,共同扫描区域覆盖范围大于整个北京市,面积约占总覆盖面积的 66%。

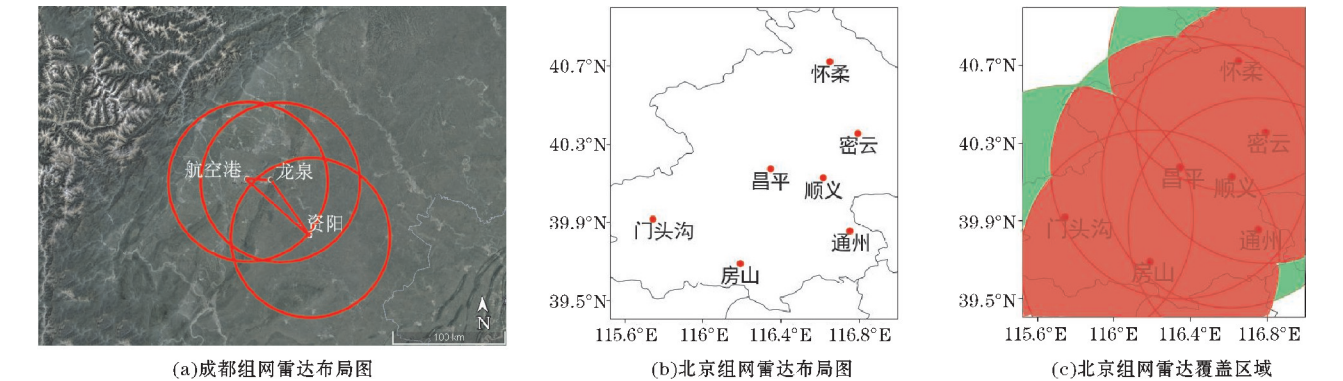


图 1 组网雷达布局图及覆盖区域

1.2 扫描策略

组网雷达协同扫描策略包括快速体扫模式和智能 RHI 扫描模式。参与组网的雷达平常执行 VCP21 探测模式,当探测到强对流回波时,启动协同扫描策略,即强回波范围内的雷达同时切换到快速体扫模式,具体扫描参数见表 1,该模式用以快速获得气象目标物的基本特征,对于中小尺度天气系统,由于其主要探测区域为快速变化的中低层回波,针对观测区域的差异性,快速体扫的仰角数在不同地区有一定调整。针对成都区域,由于地处四川盆地西部边缘,属亚热带季风气候,短时降雨多,极少出现冰雪天气,雷达探测到的大部分回波顶高都较低,回波变化迅速,同时降雨和较低高度的雷达回波强度有高相关性^[14],因此采用 5 个仰角,整个协同扫描周期可缩短至 2 分钟。

表 1 组网雷达快速体扫模式参数

| 地区 | 层数 | 仰角/° | 60 km 距离高度/km |
|----|----|------|---------------|
| 成都 | 0 | 0.5 | 0.5 |
| | 1 | 2.0 | 2.1 |
| | 2 | 3.5 | 3.7 |
| | 3 | 5 | 5.2 |
| | 4 | 6.5 | 6.8 |
| 北京 | 0 | 0.5 | 0.5 |
| | 1 | 1.5 | 1.6 |
| | 2 | 2.5 | 2.6 |
| | 3 | 3.4 | 3.6 |
| | 4 | 4.3 | 4.5 |
| | 5 | 6 | 6.3 |
| | 6 | 10 | 10.6 |
| | 7 | 14 | 15.0 |
| | 8 | 19.5 | 21.2 |

相对而言,北京位于华北平原北部,属于暖温带半湿润半干旱季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,较多产生极端天气。由于天气情况的不同,其对流发展高度较高,此时为获得更高层的回波信息,快速体扫需采用 9 个仰角,其中最高仰角为19.5°,对应最高扫描高度为21.2 km,此时协同扫描周期为 3 分钟。

智能 RHI 扫描模式则是基于每一次的快速体扫结果,对强回波进行自动识别和雷达扫描优先级计算,选择最合适的雷达自动对强回波中心执行 RHI 扫描。快速体扫的时间会影响 RHI 扫描的实时性和准确性。体扫时间越短,就能更快地根据体扫结果对强回波进行自动识别和雷达扫描优先级计算,从而更快地启动 RHI 扫描。这样可以减少每个雷达扫描数据的时差,提高 RHI 对强回波中心的定位精度,更好地反映强回波的垂直结构特征^[15-17]。

1.3 风场反演算法

在组网雷达中,基于多部雷达的共同探测区域,可以反演更准确的三维风场。本文针对多部雷达的风场反演算法,采用 Potivin 等^[18]和 North 等^[19]改进的基于三维变分法,具体思路如下。

步骤 1 将参与风场反演的每部雷达探测到的径向风速利用反距离权重法从球坐标系变换到直角坐标系:

$$V_r = \sum_{i=1}^n \alpha_i v_{ri}$$
$$\alpha_i = \frac{d_i^{-p}}{\sum_{i=1}^n d_i^{-p}}$$

式中: V_r 为直角坐标系下的一待插值点的径向风速, α_i 和 v_{ri} 分别为该待插值点邻域内每个点的权重与径向

风速值, n 为邻域内点数量, d_i 为邻域内每个点距离该待插值点的距离, p 为距离衰减参数, 通常设为 2。通过该步骤可以获得以每部雷达经纬度为中心的径向速度格点数据。

步骤 2 利用各雷达经纬度坐标对不同雷达的径向速度格点数据进行位置配准, 从而获取同一地理位置在不同雷达径向速度格点数据中的索引, 便于后续的计算。

步骤 3 构造代价函数。

设直角坐标系下某点的位置为 (x, y, z) , 将该点的三维风矢量分解为东西、南北、垂直风分量, 分别为 u 、 v 和 w 。代价函数 J 可由 4 项约束因子构成:

$$J(u, v, w) = J_0 + J_M + J_P + J_S$$

其中第一项观测约束 J_0 定义:

$$J_0 = \sum_{i=1}^N \lambda_0 (V_{ri} - V_{ri}^{ob})^2, i=1, 2, \dots, N$$

$$V_{ri}^{ob} = \frac{1}{r_i} \{ (x-x_i)u_i + (y-y_i)v_i + (z-z_i)|w_i-w_{li}| \}$$

$$r_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}$$

式中: N 为参与计算的雷达数量, V_{ri}^{ob} 与 V_{ri} 分别表示第 i 部雷达探测的径向速度和反演风速在第 i 部雷达径向上的投影, r_i 为位于空间网格点 (x_i, y_i, z_i) 的第 i 部雷达与网格点 (x, y, z) 的欧式距离, w_{li} 为粒子下落速度。

第二项质量连续性约束 J_M 定义:

$$J_M = \sum_{x,y,z} \lambda_M \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{w}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right)$$

$$\rho(z) = \rho_0 e^{\frac{-z}{H_0}}$$

式中: ρ 为空气密度, ρ_0 为地面空气密度, 值为 $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 大气定标高度 H_0 为 10 km。

第三项大气边界条件 J_P 定义:

$$J_P = \sum_{x,y,z} \lambda_P w$$

通过约束将最底层垂直风速 w 置零。

第四项平滑约束 J_S 定义:

$$J_S = \sum_{x,y,z} \lambda_{Su} (\nabla^2 u)^2 + \lambda_{Sv} (\nabla^2 v)^2 + \lambda_{Sw} (\nabla^2 w)^2$$

式中, ∇^2 为拉普拉斯算子。

以上公式中对应的参数 $\lambda_0, \lambda_M, \lambda_P, \lambda_{Su}, \lambda_{Sv}, \lambda_{Sw}$ 分别是各项约束因子的权重, 其设置依据参考 North 等^[19]提出的最优解和 Li Y 等^[20]在外场的实验结果, 分别设置为 $\lambda_0 = 1, \lambda_M = 1500, \lambda_P = 1, \lambda_{Su} = 0.01, \lambda_{Sv} = 0.01, \lambda_{Sw} = 0.01$ 。

步骤 4 三维风分量 u, v, w 的初始值设置为 0, 通过迭代梯度下降算法使代价函数最小化, 得到最优解 u, v, w :

$$u = u - \eta \frac{\partial J(u, v, w)}{\partial u}$$

$$v = v - \eta \frac{\partial J(u, v, w)}{\partial v}$$

$$w = w - \eta \frac{\partial J(u, v, w)}{\partial w}$$

迭代公式中的学习率 η 均设置为 0.0001。

2 实际观测结果分析

针对成都和北京地区组网雷达观测到的强对流天气过程的差异性, 选取成都的一次短时强降雨个例和北京的一次冰雹个例来验证组网雷达的探测效果。分析方法参考了文献[21], 其中成都的短时强降雨个例是针对对流单体的生成过程来展示快速体扫模式的探测效果, 由于该对流单体分布范围较小, 未获取完整的反演风场资料, 故只对其反射率资料进行分析; 北京的冰雹个例则针对冰雹云在不同高度层存在较为明显的动力特征去验证反演风和智能 RHI 探测的效果。

2.1 强对流单体快速演变个例

在成都组网雷达观测中, 2020 年 8 月 28 日发生了一次强对流天气过程。图 2 分别展示了对应时刻的 S 波段雷达和 X 波段组网雷达在探测同一天气过程中的回波演变情况, 其对应的扫描间隔分别为 6 分钟和 2 分钟。图 2(a)、(b) 分别是 S 波段雷达的 16:50 和 16:56 时刻的组合反射率, 可以看出两个时刻的中心

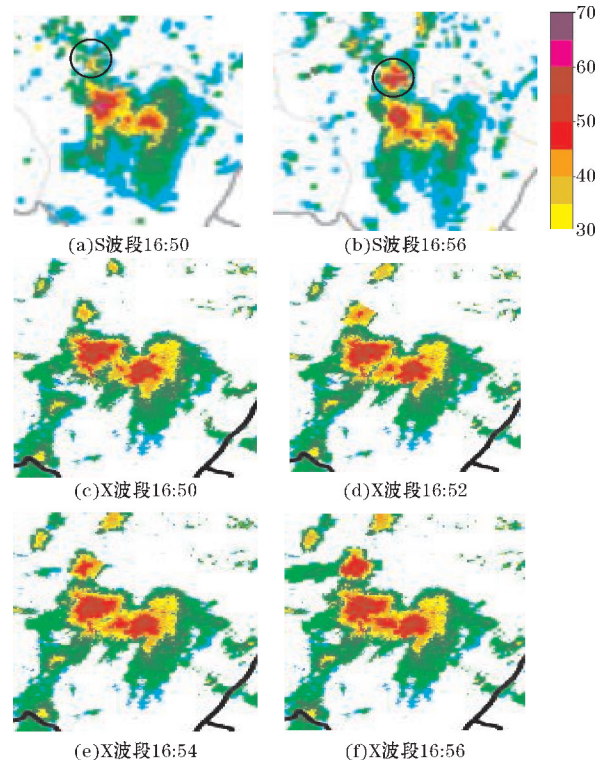


图 2 2020 年 8 月 28 日成都一次强对流天气过程中 S 波段与 X 波段组网雷达分别观测到的组合反射率图

位置均存在多单体强回波,在北部有一对流单体从无到生成(黑圈处),由于该处回波生长速度快,间隔 6 分钟的 S 波段雷达扫描会丢失发展过程中的部分信息,这对天气过程的分析或降雨预报都会造成不利的因素。图 2(c)~(f)为通过 X 波段组网雷达的快速体扫模式观测到的同一时段回波,相对于 S 波段雷达探测的结果,X 波段组网雷达测的回波在强度与结构上较为一致,且能观测到位于较北部的单体从小到大,伴随着面积与强度逐渐增长,最终形成强对流单体的整个发展过程,更高频次的数据获取能够为中小尺度天气的研究提供更多帮助。

2.2 冰雹个例

在北京组网观测中,2021 年 6 月 30 日发生了一次典型超级单体冰雹降水天气过程。此次过程强回波发展较高,需要稳定的动力结构维持。本文利用此个例分别对雷达组网的流场探测能力和垂直探测能力进行了分析,具体如下。

2.2.1 反演风验证

图 3(a)、(b)分别为 2021 年 6 月 30 日 19:24 X 波段组网雷达的组合反射率拼图及其与 4 km 高度反演风场的叠加图。图 3(c)、(d)分别为 S 波段雷达和

门头沟站单部 X 波段雷达同一时刻探测的组合反射率,门头沟站的雷达组合反射率由于电磁波衰减出现明显 V 型缺口。从图 3(b)可以看出,弱回波区域内的风向差异较小,大致为西风偏北。在强对流中心风向变化较大,呈现出气流向强中心汇聚的辐合结构。将强对流区域即图 3(a)中的黑框范围放大,并叠加 3~8 km 高度的反演风场,如图 4 所示。其中 3 km 高度(图 4a)的强回波区域内呈现气流沿逆时针旋转汇聚的气旋式辐合结构,在 4~5 km 高度(图 4b~c)气流辐合范围增大,6~7 km 高度(图 4d~e)辐合范围减小,整体风向朝着一致性发展,到了 8 km 高度(图 4f)风向一致性增强,但仍能看出气流从中心散开的辐散结构。从天气原理上分析,此次不同高度的风场特征是中低层高度气流辐合压迫气流向上运动,到高层向四周散开形成辐散的过程,该结构标志着该过程存在上升气流,这也是此次天气过程中支撑冰雹在高空发展的动力来源。

图 5 是 S 波段雷达在同一时刻观测的径向速度场,仰角为 2.42°~14.59°,其中红色表示出流,绿色表示入流。图 5 中红框对应图 3(a)中黑框位置,黑线表示雷达中心到红框中心的直线距离为 52 km,并在括号内标注了各仰角下,该直线在红框区域内对应的大

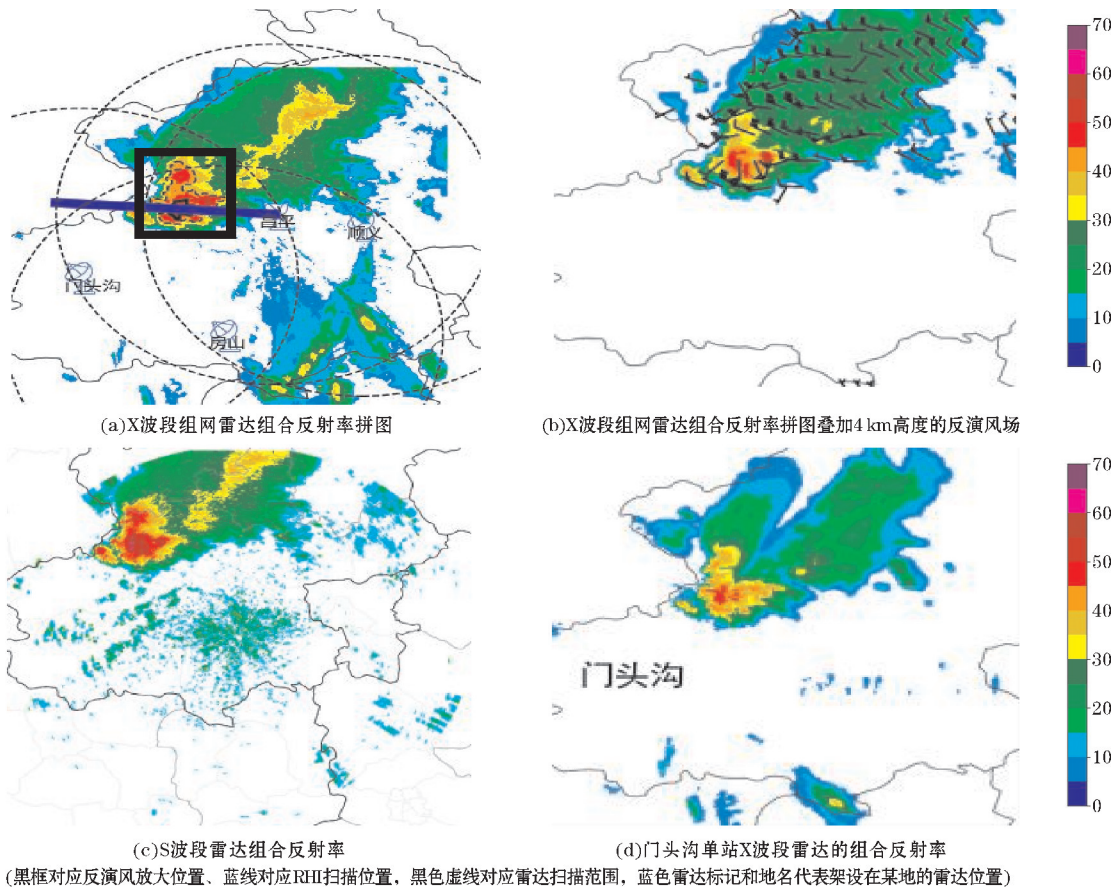


图 3 2021 年 6 月 30 日北京一次冰雹降水天气过程中 19:24 的雷达组合反射率

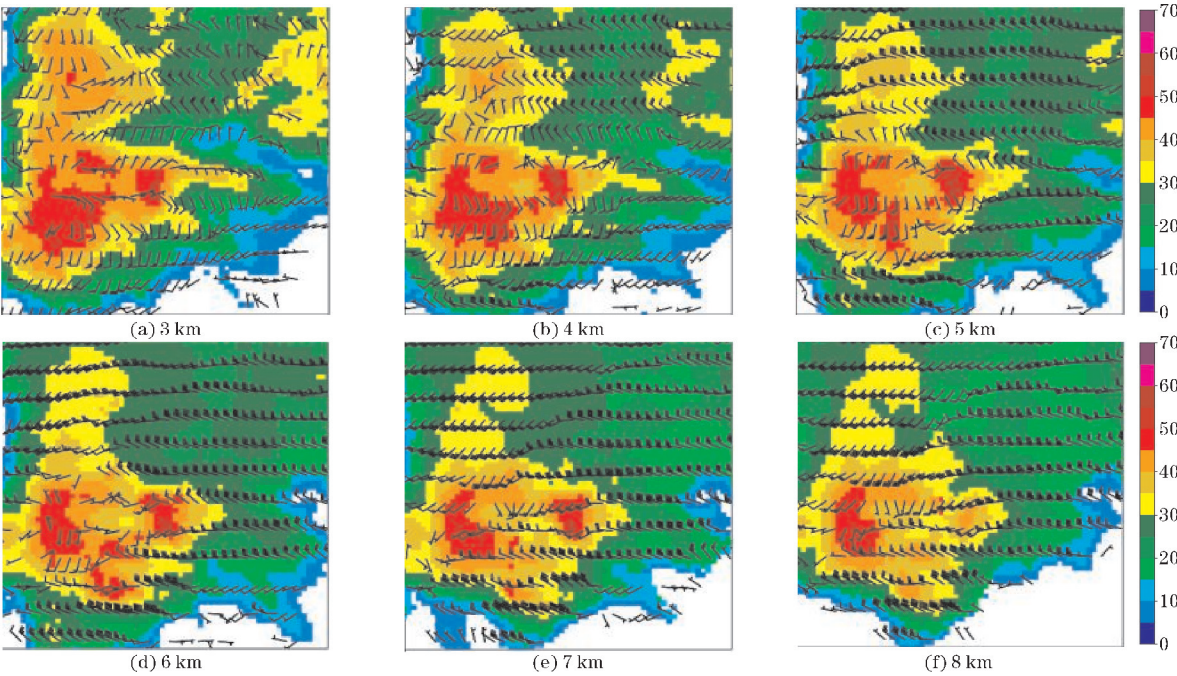


图4 图3(a)中黑框对应位置叠加不同高度的反演风场

致高度。图5 主要以红框作为分析对象,从图5(b)可以看到内部出流与外部入流在径向上的交接处形成的辐合区域(图5b 中黑色箭头交界处),其大小随高度逐渐减小,到6.02°(图5d)辐合区域减小且出现辐散,9.89°(图5e)中辐合消失,与反演风中表现出的结构吻合。此外,随着S波段雷达仰角的抬高,仰角之间对应到红框强回波位置的高度差也逐渐增大,如仰角6.02°~9.89°中,红框内大致高度为5.48~9.15 km,其间约有3.67 km高度的探测盲区。从图4 中风场随

高度变化能发现,6~8 km内风向的一致性增强,辐合逐渐消失而转为辐散,但是通过单部S波段雷达探测会丢失这部分信息。

由上所述,X波段组网雷达的反演风表现出的流场结构不仅满足天气原理的合理性,而且与S波段径向速度结构的一致性较好。由于径向速度只能表现出径向上的速度变化,而反演风能够直观表现出气旋式旋转、辐合等细节信息,并且由于多部雷达的互补能够填补仰角间的观测盲区,从而可以获得更完整的信息。

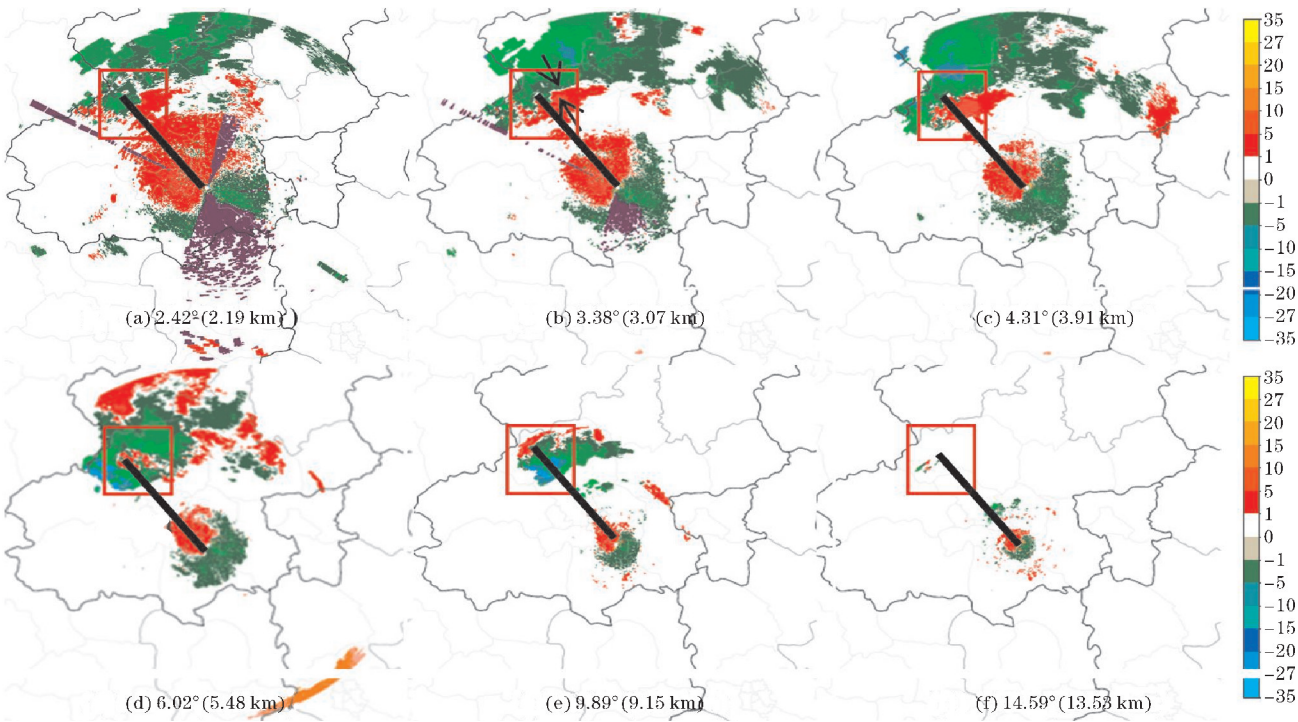
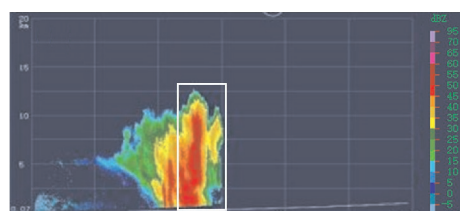


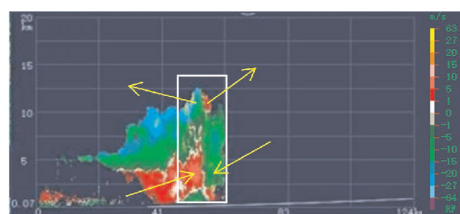
图5 2021年6月30日北京SA雷达19:24 径向速度(括号内为各图对应红框位置的大致高度)

2.2.2 智能 RHI 扫描结果

2021年6月30日19:24在上一次体扫过程中通过强回波识别算法监测到强回波中心,再按照风暴移向与距离回波位置计算参与组网的雷达的优先级,并在这一时段调度最优的雷达(此时为昌平)自动对强回波中心进行RHI扫描(图6)。图6(a)反射率图中白框区对应强回波发展最高位置,与图6(b)径向速度图中的辐合线位置相同。中低层辐合(图6b底部黄色箭头)与高层辐散(图6b高层黄色箭头)的动力结构相吻合,低层辐合结构为强回波持续在高空发展提供了上升气流支撑,随着高度的上升辐合逐渐消失转为辐散代表着气流上升至高空散开的过程。



(a) 反射率垂直结构



(b) 径向速度垂直结构

图6 昌平站雷达RHI扫描结果(RHI扫描位置参考图3a蓝色粗线)

3 结论

为检验X波段组网雷达在强对流天气监测过程中的探测能力,本文利用成都与北京组网雷达的观测数据,评价其对强对流天气过程的精细结构和演变的探测能力。

(1)对比S波段常规业务天气雷达与X波段组网雷达在同一时间地点的探测结果,可以看出两者的回波结构及变化几乎一致。而X波段组网雷达相比于S波段常规业务天气雷达,能够弥补S波段雷达在中小尺度对流天气探测中的不足,为研究小尺度天气的消机理提供帮助。

(2)利用X波段组网雷达观测对流天气过程时,可以通过多部雷达反演三维风场,在本次天气过程中得到的流场结构与天气学原理和S波段雷达探测的径向速度结构相吻合,并且能够通过组网雷达还能弥补S波段雷达在仰角间的盲区,获得更丰富的探测数据。

(3)组网扫描策略中,对重点区域自动执行的RHI扫描方式,能够在不需要人为判断的情况下准确

的探测到强对流中心的垂直结构。RHI的扫描结果相比于体扫数据的插值剖面有着更高的空间采样率,能看到更加完整和准确的垂直信息。通过组网的方式可以在不丢失体扫数据前提下更好地观察到强回波在垂直结构中的特征。

在今后的工作中,可以进一步对反演风的流场结构特征、RHI探测的垂直结构特征中会影响对流发展的如辐合、辐散等特征进行分析,以提升对灾害天气的监测能力。

参考文献:

- [1] 李柏. 天气雷达及其应用[M]. 北京:气象出版社,2011.
- [2] 陈洪滨,李兆明,段树,等. 天气雷达网络的进展[J]. 遥感技术与应用,2012,27(4):4487-495.
- [3] 俞小鼎,王迎春,陈明轩,等. 新一代天气雷达与强对流天气预警[J]. 高原气象,2005,24(3):456-464.
- [4] McLaughlin D, Pepyne D, Chandrasekar V, et al. Short-wavelength technology and the potential for distributed networks of small radar systems[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2009,90(12):1797-1818.
- [5] 李兆明. 网络雷达协同自适应观测方案及衰减订正研究[D]. 北京:中国科学院大气物理研究所,2014.
- [6] Junyent F, Chandrasekar V, McLaughlin D, et al. The CASA Integrated Project 1 networked radar system[J]. Journal of atmospheric and oceanic technology,2010,27(1):61-78.
- [7] Brotzge J, Hondl K, Philips B, et al. Evaluation of distributed collaborative adaptive sensing for detection of low-level circulations and implications for severe weather warning operations[J]. Weather and Forecasting,2010,25(1):173-189.
- [8] Bharadwaj N, Chandrasekar V, Junyent F. Signal processing system for the CASA Integrated Project 1 radars[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2010,27(9):1440-1460.
- [9] Zink M, Lyons E, Westbrook D, et al. Meteorological command & control: Architecture and performance evaluation[C]. IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE,2008,5:152-155.
- [10] Chen H, Chandrasekar V. Real-time wind velocity retrieval in the precipitation system using high-resolution operational multi-radar network[M]. Remote Sensing of Aerosols, Clouds, and Precipitation. Elsevier, 2018: 315-339.

- [11] Chen H, Chandrasekar V. The quantitative precipitation estimation system for Dallas-Fort Worth (DFW) urban remote sensing network[J]. Journal of Hydrology, 2015, 531: 259–271.
- [12] Chandrasekar V, Chen H, Philips B. Principles of high-resolution radar network for hazard mitigation and disaster management in an urban environment[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 2018, 96: 119–139.
- [13] 李思腾, 陈洪滨, 马舒庆, 等. 网络化天气雷达协同自适应观测技术的实现[J]. 气象科技, 2016, 44(4): 517–527.
- [14] 高晓荣, 梁建茵, 李春晖. 雷达定量降水估计技术及效果评估[J]. 热带气象学报, 2012, 28(1): 77–88.
- [15] He J, Li X, Yang L, et al. X-Band Weather Radar Network in Chengdu[C]. 38th Conference on Radar Meteorology. AMS, 2017.
- [16] Lei B, Xu Z X, Yang L, et al. An automatic rainfall-type classification algorithm combining diverse 3-D features of radar echoes[J]. Earth and Space Science, 2019, 6(12): 2273–2290.
- [17] Xu Z X, Yang L, Lei B, et al. An automatic framework of region-of-interest detection and classification for networked X-band weather radar system[J]. Earth and Space Science, 2020, 7(4).
- [18] Potvin C K, Shapiro A, Xue M. Impact of a vertical vorticity constraint in variational dual-Doppler wind analysis: Tests with real and simulated supercell data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2012, 29(1): 32–49.
- [19] North K W, Oue M, Kollias P, et al. Vertical air motion retrievals in deep convective clouds using the ARM scanning radar network in Oklahoma during MC3E [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2017, 10(8): 2785–2806.
- [20] Li Y, Ma S, Yang L, et al. Sensitivity analysis on Data Time Difference for wind fields synthesis of array weather radar[J]. SOLA, 2020.
- [21] 刘黎平, 吴林林, 吴翀, 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, 2014, 38(6): 1079–1094.

Analysis of Experimental Results of X-band Weather Radar Network Cooperative Observation

LIU Yang^{1,2}, YANG Ling^{1,2}, XU Zixin^{1,2}, LI Xuehua^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering, CUIT, Chengdu 610225, China; 2. CMA Key Laboratory of Atmospheric Sounding, Chengdu 610225, China)

Abstract: From 2016 to 2021, X-band weather radar network observation tests were conducted in Chengdu and Beijing, China. The purpose was to verify the observation capabilities of the network observation strategy for the evolution of meso-and small-scale weather processes, as well as its supplementary role to the S-band business radar. This article outlines the radar performance indicators, observation modes, and wind-field inversion algorithms. Through the comparison and analysis of X-band radar network data and S-band business radar data for weather examples selected in Chengdu and Beijing, the network observation strategy was found to effectively improve the detection ability of fast-evolving meso-and small-scale convective weather, and can compensate for the detection blind spots in the time domain of S-band radar. In the short-term heavy precipitation case, the network strategy observed a gradual increase in the process area and intensity of strong convective cells within the first six minutes of birth, which can effectively improve the detection ability of meso-and small-scale convective weather with rapid evolution, and can compensate for the time-domain detection blind spots of the S-band radar. During the hail process, the inversion wind field of the network radar can reflect the wind field characteristics at different heights of the strong convective center during this weather process, where the mid-and low-level height airflows converged and compressed the upward-moving airflow, and the high-level airflow spread outwards to form a divergent structure. At the same time, the radial velocity field observed by the S-band radar at the same time is mutually confirmed by the inversion wind field, but the information on the wind field variation with height will be lost through single S-band radar detection. The flow field structure obtained by the radar network and the wind field inversion algorithm conforms to the principles of meteorology and is consistent with the radial velocity structure detected by the S-band radar, which can more precisely show the dynamic structure of convective weather. The intelligent RHI scan results during the hail process show mid-and low-level convergence and high-level divergence structure of the strong echo center, reflecting the effectiveness of the intelligent RHI detection algorithm.

Keywords: radar netting; X-band weather radar; retrieval of three-dimensional wind fields; meso-and small scale system