

叶开,杨玲,马舒庆,等,2020.阵列天气雷达高分辨率强度场融合方法研究[J].气象,46(8):1065-1073. Ye K, Yang L, Ma S Q, et al, 2020. Research on high-resolution intensity field fusion method of array weather radar[J]. Meteor Mon, 46(8):1065-1073(in Chinese).

阵列天气雷达高分辨率强度场融合方法研究*

叶 开^{1,3} 杨 玲^{1,3} 马舒庆² 甄小琼^{1,3} 孙婧怡⁴

1 成都信息工程大学电子工程学院,成都 610225

2 中国气象局气象探测中心,北京 100081

3 中国气象局大气探测重点开放实验室,成都 610225

4 雷象科技(北京)有限公司,北京 100089

提 要: 阵列天气雷达是一种具有高时空分辨率的新型天气雷达,采用分布式相控阵技术探测强对流天气的精细化流场和强度场,为小尺度强对流天气研究提供了新技术及工具。文章提出一种高分辨率强度场融合方法:计算每个方位角和仰角方向分辨率扩展系数,依次对强度值进行填充;将极坐标形式强度值转换成笛卡尔坐标;对多个收发子阵强度值进行融合。利用模拟雷达探测来定性及定量地评价高分辨率强度场融合结果,验证了融合方法的有效性。通过分析了一次真实降水个例,证明了本文得到的 100 m 分辨率的强度场融合资料具有更为精细完整的回波结构。

关键词: 阵列天气雷达,高分辨率,相控阵技术,强度场,融合

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.08.006

Research on High-Resolution Intensity Field Fusion Method of Array Weather Radar

YE Kai^{1,3} YANG Ling^{1,3} MA Shuqing² ZHEN Xiaoqiong^{1,3} SUN Jingyi⁴

1 College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

3 CMA Key Laboratory of Atmospheric Sounding, Chengdu 610225

4 Rayshon Technology Co. Ltd., Beijing 100089

Abstract: Array weather radar (AWR) is a novel weather radar with high spatio-temporal resolution, which can detect the fine flow field and intensity field of severe convection weather by employing a distributed phased array technology and provide a new technology and instrument for researching the small-scale weather systems. A high-resolution intensity field fusion method is proposed in this paper. The resolution expansion factors for each azimuth and elevation direction are calculated, and the intensity is filled successively. The polar intensity field is converted to Cartesian coordinates, and the intensity field of different transmit-receive subarrays are fused. The objective evaluation of simulated small-scale severe convection detection is used to verify the performance of a proposed high-resolution fusion method. Through a case of real precipitation process, it is proved that 100 m intensity field fusion data obtained in this paper has a more detailed and complete echo structure.

Key words: array weather radar (AWR), high-resolution, phased array technology, intensity field, fusion

* 国家自然科学基金国家重大科研仪器研制(部委推荐)项目(31727901)资助

2019年6月12日收稿; 2019年11月15日收修定稿

第一作者:叶开,主要从事阵列天气雷达和图像处理研究. E-mail:ekin_kai@foxmail.com

通讯作者:马舒庆,主要从事阵列天气雷达和大气廓线探测研究. E-mail:msqaoc@cma.gov.cn

引 言

天气雷达在对灾害性的中小尺度天气系统监测预警中发挥着极大的作用(吴翀等,2014;刘黎平等,2015)。由于单部雷达探测的区域相对局限,因此不能完全地探测到一个天气系统的完整结构(杨吉等,2015)。为了提高对中尺度灾害性天气的监测预警,发挥出天气雷达网的联合监测作用,国内外先后采用多部雷达资料进行组网拼图研究(肖艳姣和刘黎平,2006)。2002年,美国提出了高分辨率拼图方法,得到时间分辨率为5 min,空间分辨率为2 km的雷达拼图资料(胡胜等,2006)。2004年,国家气象中心开展了新一代天气雷达拼图相关研究工作并投入业务化运行,时间分辨率为60 min,空间分辨率为10 km(潘留杰等,2010)。方法大致为:把极坐标系下的空间分辨率不均匀的雷达数据插值到统一的笛卡尔坐标系,形成径向和切向分辨率均匀的网格点资料;最后把来自多个雷达的格点反射率场重叠部分拼接起来形成雷达网三维拼图反射率格点场。国内外常用拼接方法包括最近邻居法、最大值法、权重平均方法和算术平均法等(Zhang et al, 2005;杨洪平等,2009;韩成鸣等,2016)。总的来说,没有一种适用于所有条件的拼图方法,大多都是为具体的应用而提出和选取。

美国国家科学基金会于2003年成立了大气协同自适应遥感(Collaborative Adaptive Sensing of the Atmosphere, CASA)工程研究中心。CASA项目首次提出了网络化天气雷达的概念,利用多部天气雷达组成网络化雷达系统,通过分布式协同自适应探测(Distributed Collaborative Adaptive Sensing, DCAS)模式,在最感兴趣区域进行观测并获得更高时空分辨率的气象资料,满足观测、预测和预警方面的需求,在灾害监测中发挥更大作用(Chandrasekar et al, 2013; Bharadwaj et al, 2010)。Liu et al(2007)将差分相位产生的协相关系数和衰减系数引入插值过程中,导出复合场的加权方案和数据质量指数场,其时间和空间分辨率分别是60 s和100 m。Bharadwaj and Chandrasekar(2011)提出了分辨率增强系统(resolution enhancement system, RES),在X波段网络化雷达中使用不同视角的概

念来提高反射率因子的空间分辨率,证明了RES比普通拼图具有更高分辨率,但并未对效果做定量评价。同年,Yoshikawa et al(2011)利用Ku波段网络化雷达对同一目标探测来提高空间分辨率。由于硬件条件限制,只有两部Ku波段天气雷达参与了试验。

2013年,由中国科学院大气物理研究所与南京恩瑞特公司合作筹建了国内第一部网络化雷达。南京网络化雷达由四部X波段雷达组成,大致呈菱形结构分布,有效探测距离为60 km,布设在南京及其周边。X波段网络化雷达可对重点关注区域进行高时空分辨率的自适应探测,获取到多个降水过程数据,为协同自适应观测技术和网络化雷达的研究与评估提供很好的支持(陈洪滨等,2012;李思腾等,2016)。2015年,日本建立大阪城市相控阵雷达示范网络,并将产品实时提供给大阪政府。这也是天气雷达历史上首次采用两部相控阵雷达组成雷达网,弥补了传统雷达组网探测时差大和扫描速度慢的不足,也代表了网络化雷达的新发展,进一步为天气雷达精细化探测提供方向(Yoshikawa et al, 2013;练学辉和彭芑,2017;于明慧等,2019)。

2017年,中国气象局气象探测中心设计并研制了第一部阵列天气雷达。2018年4月,由湖南宜通华盛科技有限公司生产的具有三个收发子阵的阵列天气雷达已经成功布设在长沙黄花国际机场并开始了外场观测试验(马舒庆等,2019),三个子阵布局如图1所示。

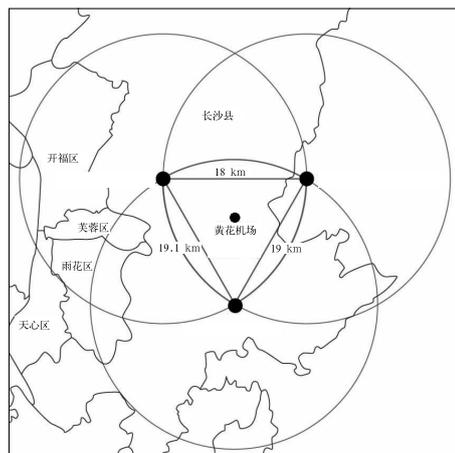


图1 长沙黄花国际机场阵列天气雷达布局
Fig. 1 The array weather radar layout at Changsha Huanghua International Airport

1 阵列天气雷达

现有天气雷达在灾害监测和大气科学研究中发挥了极大作用,但是难以获取时间空间变化很快的小尺度天气,如龙卷风、冰雹、对流性强降水的精细化结构。想要深入认识小尺度强对流天气的消长机理,提高监测预警能力,就必须获取其高分辨率资料。近年发展的短距离相控阵天气雷达能够提高探测的时间分辨率,但只能获得径向速度。网络化天气雷达能够获取低速运动的天气系统的速度场,但是不能获取龙卷等强天气的真实流场,限制了对这类强对流天气的研究。阵列天气雷达是分布式、高度协同的相控阵天气雷达,综合了相控阵天气雷达和网络化雷达各自优势,既能在空间上做到全覆盖,又较大程度地提高了时间分辨率。因此,阵列天气雷达可成为对小尺度强对流天气系统深入研究的有力工具。

阵列天气雷达必须至少由三个收发子阵为一组进行协同探测。阵列天气雷达每个收发子阵具有 4 个发射波束和 64 个接收波束,覆盖 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 仰角和 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 方位。三个收发子阵分别布设在三角形(最好是等边三角形)的顶点。图 2 是三个收发子阵布局及探测范围的示意图。由于单个收发子阵对

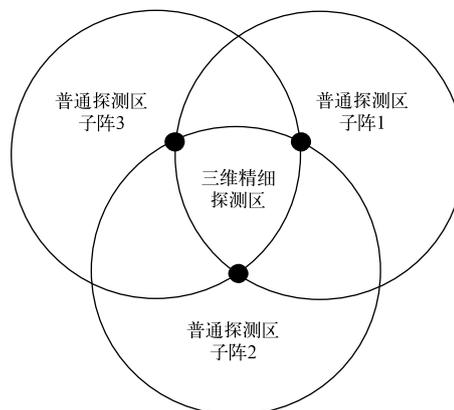


图 2 三个收发子阵布局及探测区
Fig. 2 Deployment of three transmit-receive subarrays and detection area

60° 范围的三维精细探测区扫描用时约为 2 s,因此在控制三个收发子阵同时进入三维精细探测区的前提下,其探测资料时差约为 2 s。当然,三个收发子阵在三维精细探测区域外的圆形区域也能获取探测资料,这些区域被称为普通探测区。

表 1 给出了阵列天气雷达系统与其他雷达系统探测能力的对比情况,由表 1 可见,阵列天气雷达可揭示中小尺度天气系统更精细、更完整的变化规律。阵列天气雷达系统主要技术指标见表 2。

表 1 阵列天气雷达系统与其他雷达系统探测能力对比

Table 1 Comparison of detection capabilities between the AWR and other radar systems

	多普勒天气雷达	相控阵多普勒天气雷达	网络化天气雷达	阵列天气雷达
平均时间分辨率/min	6	1	1	0.2
平均空间分辨率/km	1~2	1~2	0.1~0.2	0.1~0.2
空间覆盖率/%	60	60	60	100
速度信息	一维	一维	部分三维	三维
同一空间最大资料时差	/	/	1 min	2 s
判断强天气的主要信息	回波强度	回波强度	回波强度、部分云雨粒子速度	回波强度、云雨粒子速度
描述强天气强度结构	粗	粗	细	细
描述强天气流场结构	不能	不能	能描述低速变化的流场	能
判断强天气的准确性	一般	一般	较好	好

2 阵列天气雷达高分辨率强度场融合方法

2.1 高分辨率强度场融合原理

雷达分辨率通常指时间分辨率和空间分辨率(何建新和李学华,2013),时间分辨率一般由雷达扫描模式决定,空间分辨率包括距离(径向)分辨率、方

位分辨率和仰角分辨率。雷达距离库数据代表有效照射体积内所有散射粒子返回的电磁功率总和。由于雷达抽样体积的球面几何形状,抽样体积大小随着距离的增大而增大,因此空间分辨率并不均匀(吴翀等,2016)。其中,雷达的距离分辨率由雷达发射脉冲宽度决定,不会随距离改变。方位和仰角分辨率由天线的波束宽度决定。即使两个散射体位于相同距离的不同方位(或不同俯仰角),只要同在天线主瓣内,就会被同时照射,因此回波会被雷达同时接收。

以阵列天气雷达的 1.6°波束宽度为例,当探测距离为 20 km 时,实际方位分辨率已经变为 0.56 km。

阵列天气雷达利用多个子阵进行协同探测,因此可提供来自不同方向探测到的反射率因子分布结构。要想在更远的距离获得高精度切向分辨率,直接办法是增大天线尺寸或减小发射脉冲宽度,这意味着需要更新发射机、天线等硬件。本文利用径向的高分辨率来弥补随距离增加而逐渐模糊的切向分辨率的思想,提出了一种通过阵列天气雷达重建出更高分辨率反射率因子数据的方法。图 3 是两个子阵从不同方向探测同一回波的示意图,不同角度的雷达扫描使精细探测区具有更完整的回波结构,其中黑色实线和虚线重叠区域为两个子阵相交波束共同探测到的区域,揭示了分辨率提高原理。

2.2 高分辨率强度场融合方法

高分辨率强度场融合方法利用阵列天气雷达体

表 2 阵列天气雷达系统主要技术指标

Table 2 Main technical specifications of the AWR

名称	主要技术指标
技术体制	全固态、全相参、一维相控阵、多普勒
工作频段	X 波段
工作频率/MHz	9 300~9 500
收发子阵间距/km	20~60
距离分辨率	≤50 m
水平波束宽度/(°)	1.6
垂直波束宽度/(°)	1.6
天线扫描方式及范围(方位)	0°~360°(机械扫描)
天线扫描方式及范围(俯仰)	0°~90°(电扫描)
强回波模式三维子区探测时间	2 s(方位 60°,俯仰 90°)
普通模式三维子区探测时间	12 s(方位 360°,俯仰 90°)
最小可测回波强度 (10 km)/dBz	4
天线面积	1.2 m×1.2 m
发射峰值功率	不小于 320 W
重量/kg	300

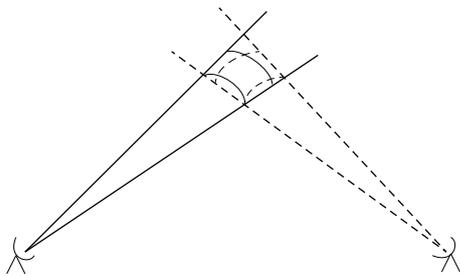


图 3 阵列天气雷达分辨率增强原理
Fig. 3 Theory of the AWR for resolution enhancement

扫数据重建真实的强度场探测资料,转换到同一笛卡尔坐标,并对多个子阵数据进行融合,形成空间分辨率均匀的格点资料。高分辨率强度场融合流程图见图 4。其中,第一步为数据预处理,包括地物杂波剔除、孤立杂波剔除、噪声订正和衰减订正等,这里主要对后面的步骤做进一步的介绍。

(1)计算方位向和仰角方向分辨率扩展系数。

$$E = \frac{A \times R}{r} \tag{1}$$

式中:A 为方位和仰角波束宽度,R 为该距离库与所在子阵的距离,r 为径向分辨率,E 为分辨率扩展系数。阵列天气雷达系统每个子阵的水平垂直波束宽度均为 1.6°。假定子阵最大探测距离为 40 km,则在 40 km 处分辨率扩展系数 E 约为 12。

(2)方位向和仰角方向强度值填充。方位向填充方法类似线性插值,其示意图见图 5a。首先,计算相邻方位角上的两个强度值之差,然后计算所在径向探测距离的分辨率扩展系数,即所在两个方位向之间需要填充强度值的总个数。最后,依次给 a₁ 至 a_n 填充。以 a_n 这一点的值举例,其强度值公式:

$$a_n = \frac{(Z_1 - Z_2)}{E} \times n + Z_1 \tag{2}$$

式中:Z₁ 和 Z₂ 分别代表相邻方位向上的两个反射率因子值,E 为该位置的分辨率扩展系数,n 为 a_n 点所在索引值。

仰角方向填充示意图见图 5b。填充方法类似于取邻近值:首先计算出当前位置分辨率扩展系数,即两个仰角方向之间需要填充的强度值的总个数。再将其分成两部分,靠近 Z₁ 的一半均取 Z₁ 反射率因子值,靠近 Z₂ 的另一半均取 Z₂ 反射率因子值。

(3)融合。融合前需要把极坐标下的单个子阵数据分别转换到对应的笛卡尔坐标,并保证所有子阵格点信息在同一坐标原点并按照经纬度和高度对齐。多个子阵重叠区域的探测资料采用平均值法处理,融合强度值公式如下:

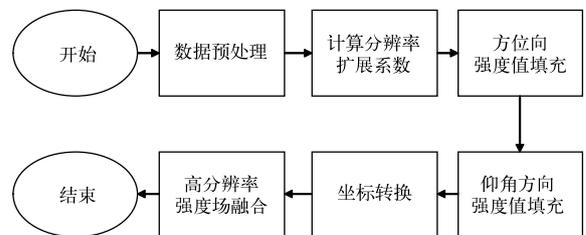


图 4 高分辨率强度场融合框图
Fig. 4 High-resolution intensity field fusion block diagram

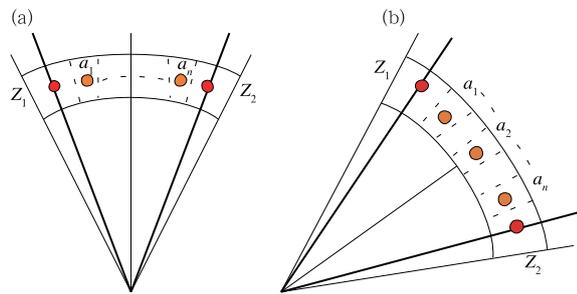


图 5 方位向(a)和仰角方向(b)填充示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of azimuth filling (a) and elevation filling (b)

$$Z = \frac{\sum_{n=1}^N Z_n}{N} \quad (3)$$

式中: N 代表当前格点位置被子阵覆盖的个数, Z_n 为第 n 个子阵探测到的反射率因子值, Z 为融合后的反射率因子值。

3 融合结果分析及有效性验证

3.1 模拟探测及有效性分析

由于没有高分辨率真实回波作为参考标准,本文主要通过模拟雷达探测的方式来定性及定量地评价强度场融合效果。本文首先采用单个子阵的模拟探测强对流天气回波,再进行高分辨率强度场融合,最后通过比对重建数据与假设的标准数据来评价分辨率提高效果。

在模拟探测试验中,将两个子阵分别设置在距离回波正西方 d_1 和正南方 d_2 位置处,波束宽度设为 1.6° ,径向上间隔 30 m 取一个数据点,即距离分辨率为 30 m,且不考虑系统误差和损耗。模拟探测示意图见图 6。图 7 为本文假设的强对流天气回波,数据来源于阵列天气雷达单个子阵在一次强对流天气过程的探测数据,范围为 $6 \text{ km} \times 6 \text{ km}$,图中每一个数据点代表 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 范围,以此作为标准数据。该强对流回波具有一个强中心,强度最大值达到 64 dBz。

模拟单个子阵扫描时,首先计算每一个数据点所在的方位角和径向距离,以此判断是否处在同一距离库。再将同一距离库所有数据点的用均值填充来模拟雷达对目标照射原理。图 8a 和 8b 是子阵 1 和 2 在 $d_1 = d_2 = 5 \text{ km}$ 处的模拟探测结果。两个子

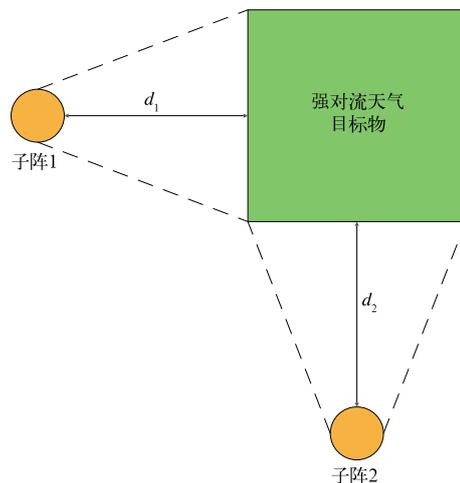


图 6 模拟探测示意图

Fig. 6 Schematic diagram of simulated detection

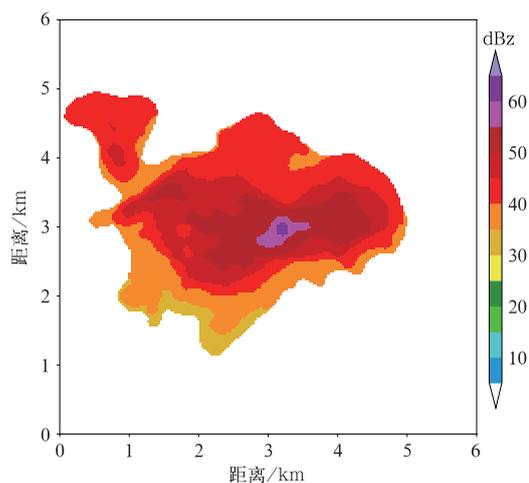


图 7 假设的强对流天气回波

Fig. 7 Assumed severe convective weather echo

阵强度值融合前,首先按照 2.2 节提到的填充方法,对相邻方位角上的两个强度值依次进行线性填充。由于模拟回波是一个二维面,所以不考虑俯仰的填充问题。图 8c 为高分辨率强度场融合结果,融合采用平均值法。从模拟的主观效果来看,子阵 1 和 2 能够探测到目标物的强中心,两个子阵探测到回波结构与原始回波较为一致。但由于方位分辨率随距离增加而变差,两个子阵探测效果有较大程度的切向模糊效果。由图可见,融合后的强度场与原始回波数据相比,结果更为一致,不仅能还原出回波强中心,而且层次更加鲜明饱满,还原度更高。

为了进一步验证高分辨率强度场融合方法的有效性,更改了天气目标物与两个子阵的距离,令 $d_1 = 5 \text{ km}, d_2 = 10 \text{ km}$,即天气目标物距离子阵 1 和 2

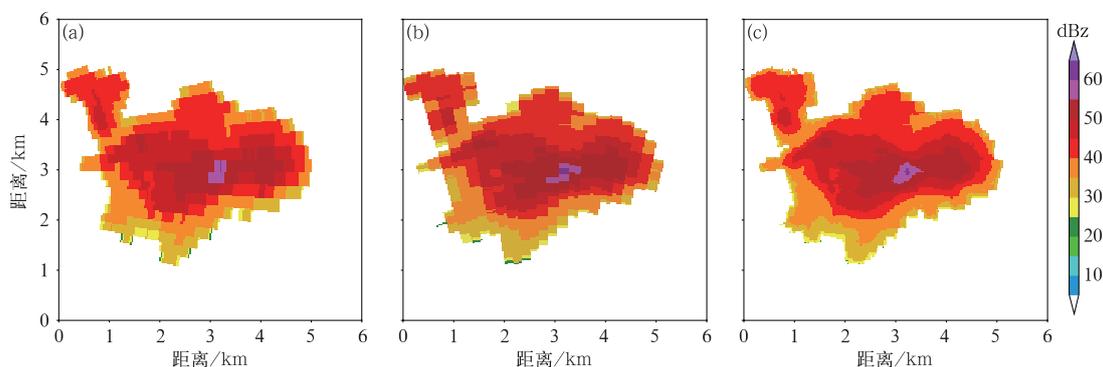


图 8 $d_1=d_2=5$ km 处(a)子阵 1 和(b)子阵 2 模拟探测结果,(c)高分辨率强度场融合结果

Fig. 8 $d_1=d_2=5$ km simulated detection results of (a) Subarray 1 and (b) Subarray 2, and (c) high-resolution intensity field fusion

分别为 5 和 10 km。子阵 1 在 5 km 处探测结果已在图 8a 中给出,子阵 2 在 10 km 处探测结果如图 9a 所示,在不等距情况下($d_1=5$ km, $d_2=10$ km),高分辨率融合结果如图 9b。如图所示,随着距离增加,子阵探测的切向模糊效果更明显。在不等距条件下,融合后仍然可以恢复回波强中心,回波结构与原始回波同样接近。

高分辨率强度场融合必须同时满足雷达资料时间分辨率和空间分辨率都足够高。因此针对时间分辨率过大的雷达资料,融合后也不能完全重建出精细的回波结构。为了证明时差对融合结果的影响,本文设计了一组模拟试验:假设子阵 2 同样在目标物正南方 5 km,而将子阵 1 与子阵 2 扫描时差分别设置为 30 和 60 s,且天气系统以 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度向正北移动。这样当子阵 1 探测到该目标物时,其

实际位置已分别处在目标物的正西方 5.6 和 6.2 km。两个子阵 30 和 60 s 时差的融合结果分别如图 10a 和 10b 所示。通过将图 10 与图 7 进行主观效果的对比,原始回波中 60 dBz 以上的强中心不能被重建出来,且 55~60 dBz 的回波区域重建为两个,资料失真较严重。由图可知,时差越大,强中心位置越偏离原始位置,重建效果越不理想。

为了客观地评价融合效果,本文采用相关系数(CC)和均方根误差(RMSE)两个参数进行定量评价,公式如下:

$$CC = \sqrt{\frac{\text{cov}(Z_t, Z_r)}{s(Z_t)s(Z_r)}} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_t - Z_r)^2} \quad (5)$$

式中: Z_t 和 Z_r 分别表示原始的和重建出的强度值,

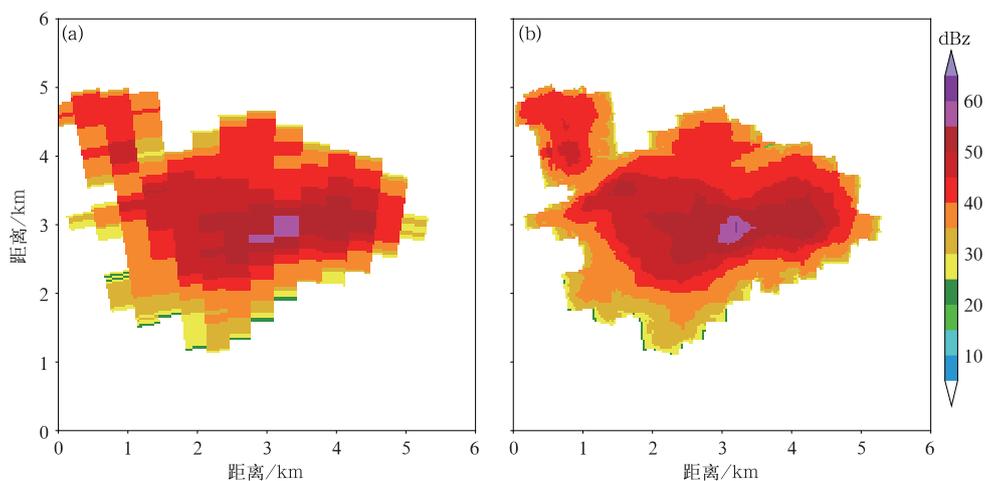


图 9 $d_1=5$ km, $d_2=10$ km 处(a)子阵 2 模拟探测结果,(b)高分辨率强度场融合结果

Fig. 9 $d_1=5$ km and $d_2=10$ km (a) simulated detection result of Subarray 2 and (b) high-resolution intensity field fusion

cov 为协方差, s 为标准方差。CC 值越接近 1, 表示重建出的数据与参考数据一致性越好。RMSE 值越小, 说明重建的总体数据与参考数据误差越小。

本文分别比对单个子阵和融合所得数据与原始的回波数据, 结果如表 3 所示。从表 3 看出, 高分辨率强度场融合所得的相关系数为 0.99, 高于单个子阵探测结果和 30、60 s 时差融合结果。60 s 时差给融合结果带来的误差最大。30 和 60 s 时差的融合结果不如单个子阵探测效果, 这说明了高时间分辨率对于雷达资料合成的重要性。高分辨率强度场融合后与原始回波的相关系数最高, 均方根误差最小, 体现了高时空分辨率强度场融合优越性, 证明了高分辨率融合后的结果可以改善由单个子阵探测的误差。在 $d_1=5\text{ km}, d_2=10\text{ km}$ 条件下, 融合结果与原始回波的相关系数为 0.99, 均方根误差同样小于单个子阵探测结果, 从客观角度进一步验证了高分辨率融合方法的有效性。

表 3 模拟探测效果评价

Table 3 Evaluation of the effect of simulated detection			
	参数设置	相关系数	均方根误差
子阵 1	$d_1=5\text{ km}$	0.96	1.65
子阵 2	$d_2=5\text{ km}$	0.97	1.38
	$d_2=10\text{ km}$	0.95	1.87
时差融合	30 s	0.90	2.44
	60 s	0.87	2.76
高分辨率融合	$d_1=d_2=5\text{ km}$	0.99	0.63
	$d_1=5\text{ km}, d_2=10\text{ km}$	0.99	0.96

3.2 高分辨率强度场融合实现

2018 年 8 月 15 日 13:30—15:00, 长沙黄花国际机场附近出现一次阵性降水过程。降水回波整体朝西南方向移动, 回波顶高最高达 10 km, 范围大约为 $30\text{ km} \times 30\text{ km}$ 。本文选取 2018 年 8 月 15 日 13:49 探测资料(图 11)进行高分辨率强度场融合试验(图 12)。

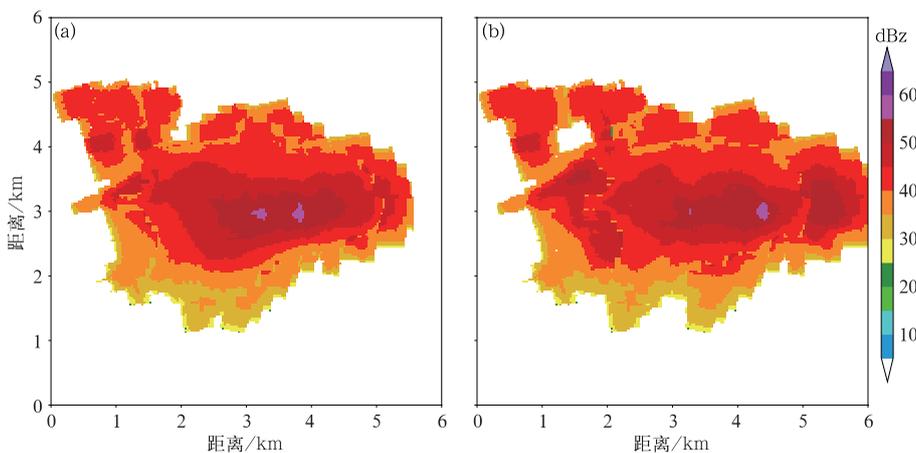


图 10 30 s(a)和 60 s(b)时差融合效果

Fig. 10 Fusion results of 30 s (a) and 60 s (b) time difference

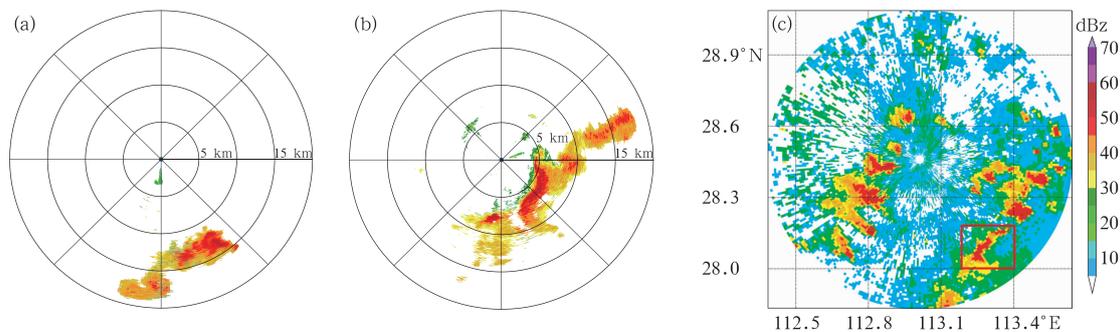


图 11 2018 年 8 月 15 日 13:49(a)子阵 1 的 19.7° 仰角和(b)子阵 2 的 7° 仰角 PPI,
(c)13:51 长沙 CINRAD 雷达 0.6° 仰角 PPI

Fig. 11 PPI images of the AWR (a) Subarray 1 at elevation of 19.7° , (b) Subarray 2 at elevation of 7° at 13:49 BT, (c) CINRAD radar at elevation of 0.6° at 13:51 BT 15 August 2018

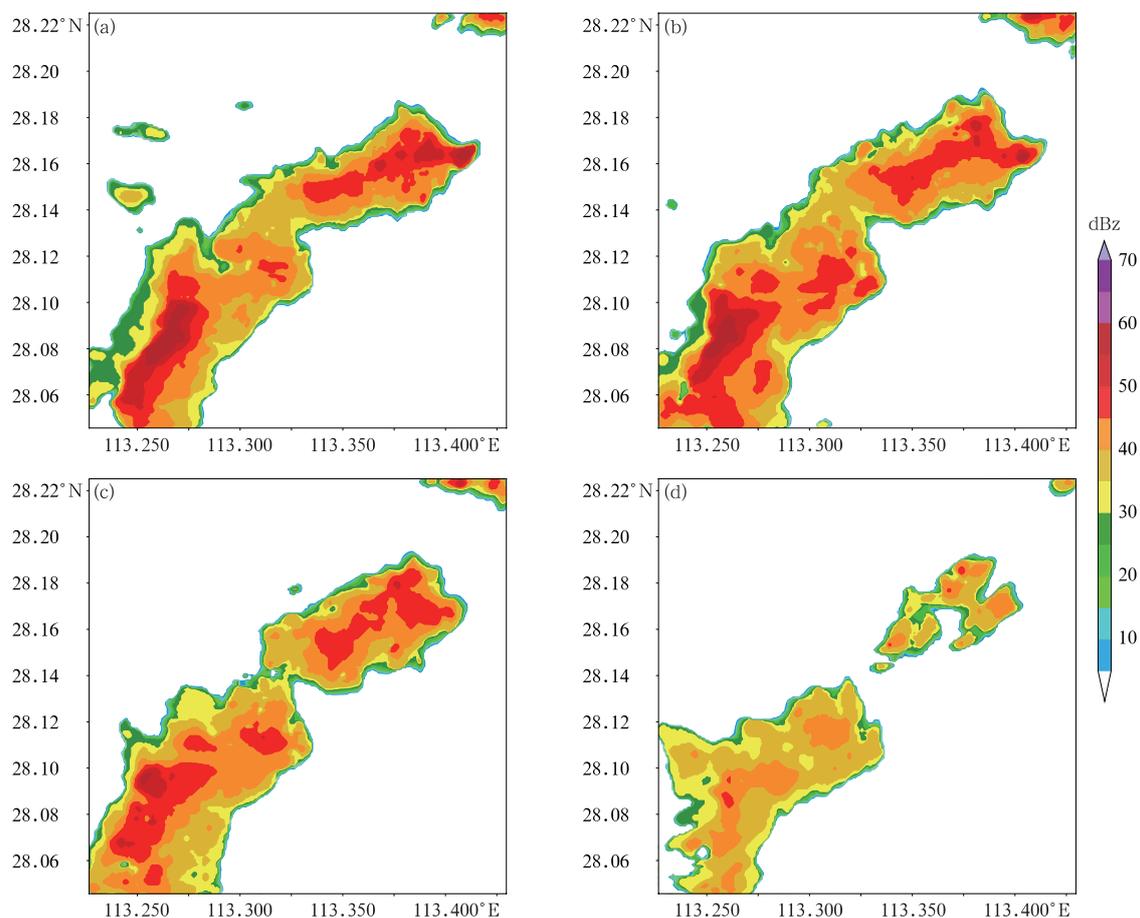


图 12 2018 年 8 月 15 日 13:49 阵列天气雷达(a)1 km,(b)2.5 km,(c)4 km,(d)5.5 km 不同高度 CAPPI
Fig. 12 CAPPI images of the AWR at different heights of (a) 1 km, (b) 2.5 km,
(c) 4 km, (d) 5.5 km at 13:49 BT 15 August 2018

图 11a 和 11b 分别给出了子阵 1 和子阵 2 的 PPI 图,两个子阵有共同探测到的回波。图 11c 为与该时刻最接近的长沙 CINRAD/SA 雷达的 0.6° 仰角 PPI 图,红色方框区域与图 11a 和 11b 的地理位置相同。图 12 分别给出了该时刻融合区域的不同高度(1、2.5、4 和 5.5 km)CAPPI 图,从图中可以看出,在不同高度层的融合结果具有较精细和完整的回波结构。与 CINRAD 雷达相比,阵列天气雷达回波细节明显更加丰富,进一步验证了融合结果的有效性。

4 结 论

针对中小尺度强对流天气精细化探测需求,本文对阵列天气雷达高分辨率强度场融合方法进行了研究,主要结果如下。

(1)提出一种高分辨率强度场融合方法,首先分

别对多个收发子阵的极坐标下的反射率因子进行填充,再转换为三维格点坐标,最后将多个收发子阵的强度值进行融合,重建出高分辨率强度场。

(2)为了同时能进行主客观评价融合效果,通过对强对流天气回波的模拟探测,证明了融合过程降低单个子阵带来的切向模糊效果,还原出了更精细和完整的回波;本文采用相关系数和均方根误差来评价重建数据与原始数据间的误差,试验数据验证了高时空分辨率融合结果可以改善由单个子阵扫描造成的误差。

(3)对 2018 年 8 月 15 日长沙机场附近一次真实降水个例进行高分辨率强度场融合试验,通过与长沙 CINRAD 雷达回波数据的比对分析,证明了阵列天气雷达具有更精细化、细节更突出的回波结构。

本文在模拟探测试验中对两个子阵的融合效果进行了评价,没有加入三个或多个子阵融合结果的评价。同时,在与 CINRAD 雷达的强度对比中,仅

进行了主观对比,没有做量化对比分析,这是今后研究的方向。阵列天气雷达尚处在初步阶段,未来还需在更多的实际应用中得到不断改善和验证。

参考文献

- 陈洪滨,李兆明,段树,等,2012. 天气雷达网络的进展[J]. 遥感技术与应用,27(4):487-495. Chen H B, Li Z M, Duan S, et al, 2012. The development of weather radar network[J]. Remote Sens Technol Appl, 27(4):487-495(in Chinese).
- 韩成鸣,李耀东,史小康,2016. LAPS 雷达反射率拼图方法改进及静锥区填充方法研究[J]. 气象,42(3):322-329. Han C M, Li Y D, Shi X K, 2016. Improvement of mosaic method for LAPS radar reflectivity and research on filling method for the "Cone of Silence"[J]. Meteor Mon, 42(3):322-329(in Chinese).
- 何建新,李学华,2013. 超分辨率处理技术在多普勒天气雷达中的应用探究[J]. 成都信息工程学院学报,28(1):1-7. He J X, Li X H, 2013. Discuss of the application of super-resolution technique in Doppler weather radar[J]. J Chengdu Univ Inf Technol, 28(1):1-7(in Chinese).
- 胡胜,伍志方,刘运策,等,2006. 新一代多普勒天气雷达广东省区域拼图初探[J]. 气象科学,26(1):74-80. Hu S, Wu Z F, Liu Y C, et al, 2006. The primary study about the Guangdong Province regional CINRAD mosaic[J]. Sci Meteor Sin, 26(1):74-80(in Chinese).
- 李思腾,陈洪滨,马舒庆,等,2016. 网络化天气雷达协同自适应观测技术的实现[J]. 气象科技,44(4):517-527. Li S T, Chen H B, Ma S Q, et al, 2016. Preliminary results of adaptive and collaborative observations by a networked weather radar system in Nanjing[J]. Meteor Sci Technol, 44(4):517-527(in Chinese).
- 练学辉,彭芃,2017. 日本气象雷达发展特点及技术现状分析[J]. 雷达与对抗,37(2):5-9. Lian X H, Peng P, 2017. Analysis on technical status and development characteristics of Japanese weather radars[J]. Radar ECM, 37(2):5-9(in Chinese).
- 刘黎平,吴翀,汪旭东,等,2015. X 波段一维扫描有源相控阵天气雷达测试定标方法[J]. 应用气象学报,26(2):129-140. Liu L P, Wu C, Wang X D, et al, 2015. Test and calibration methods for X-band active phased-array weather radar[J]. J Appl Meteor Sci, 26(2):129-140(in Chinese).
- 马舒庆,陈洪滨,王国荣,等,2019. 阵列天气雷达设计与初步实现[J]. 应用气象学报,30(1):1-12. Ma S Q, Chen H B, Wang G R, et al, 2019. Design and initial implementation of array weather radar[J]. J Appl Meteor Sci, 30(1):1-12(in Chinese).
- 潘留杰,朱伟军,周毓荃,等,2010. 天气雷达资料的三维格点化及拼图初探[J]. 安徽农业科学,38(5):2517-2519, 2570. Pan L J, Zhu W J, Zhou Y Q, et al, 2010. Primary study on three-dimensional gridding weather radar data and CINRAD mosaic[J]. J Anhui Agric Sci, 38(5):2517-2519, 2570(in Chinese).
- 吴翀,刘黎平,汪旭东,等,2014. 相控阵雷达扫描方式对回波强度测量的影响[J]. 应用气象学报,25(4):406-414. Wu C, Liu L P, Wang X D, et al, 2014. The measurement influence of reflectivity factor caused by scanning mode from phased array radar[J]. J Appl Meteor Sci, 25(4):406-414(in Chinese).
- 吴翀,刘黎平,吴海涛,2016. 多部 X 波段天气雷达测量偏差分布及组网拼图结果分析[J]. 高原气象,35(3):823-833. Wu C, Liu L P, Wu H T, 2016. Measurement bias and mosaics analysis for X band Doppler radars[J]. Plateau Meteor, 35(3):823-833(in Chinese).
- 肖艳姣,刘黎平,2006. 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,64(5):647-657. Xiao Y J, Liu L P, 2006. Study of methods for interpolating data from weather radar network to 3-D grid and mosaics[J]. Acta Meteor Sin, 64(5):647-657(in Chinese).
- 杨洪平,张沛源,程明虎,等,2009. 多普勒天气雷达组网拼图有效数据区域分析[J]. 应用气象学报,20(1):47-55. Yang H P, Zhang P Y, Cheng M H, et al, 2009. The valid mosaic data region of the CINRAD network[J]. J Appl Meteor Sci, 20(1):47-55(in Chinese).
- 杨吉,郑媛媛,夏文梅,等,2015. 雷达拼图资料上中尺度对流系统的跟踪与预报[J]. 气象,41(6):738-744. Yang J, Zheng Y Y, Xia W M, et al, 2015. Mesoscale Convective Systems (MCSs) tracking and nowcasting based on radar mosaic data[J]. Meteor Mon, 41(6):738-744(in Chinese).
- 于明慧,刘黎平,吴翀,等,2019. 利用相控阵及双偏振雷达对 2016 年 6 月 3 日华南一次强对流过程的分析[J]. 气象,45(3):330-344. Yu M H, Liu L P, Wu C, et al, 2019. Analysis of severe convective process in South China on 3 June 2016 using phased-array and dual-polarization radar[J]. Meteor Mon, 45(3):330-344(in Chinese).
- Bharadwaj N, Chandrasekar V, 2011. Resolution enhancement system for networked radar system[C]//Proceedings of the 35th Conference on Radar Meteorology. Pittsburgh: American Meteorological Society.
- Bharadwaj N, Chandrasekar V, Junyent F, 2010. Signal processing system for the CASA integrated project I radars[J]. J Atmos Oceanic Technol, 27(9):1440-1460.
- Chandrasekar V, Chen H N, Philips B, et al, 2013. The CASA Dallas Fort Worth remote sensing network ICT for urban disaster mitigation[C]//Proceedings of the EGU General Assembly Conference. Vienna: EGU.
- Liu Y X, Wang Y T, Chandrasekar V, et al, 2007. Real-time three-dimensional radar mosaic in CASA IP1 testbed[C]//Proceedings of 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona: IEEE; 2754-2757.
- Yoshikawa E, Ushio T, Kawasaki Z, et al, 2013. MMSE beam forming on fast-scanning phased array weather radar[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 51(5):3077-3088.
- Yoshikawa E, Yoshida S, Morimoto T, et al, 2011. Spatial resolution of a meteorological radar network consisting of high range and temporal resolution radars[C]//Proceedings of the 35th Conference on Radar Meteorology. Pittsburgh: American Meteorological Society.
- Zhang J, Howard K, Gourley J J, 2005. Constructing three-dimensional multiple-radar reflectivity mosaics: examples of convective storms and stratiform rain echoes[J]. J Atmos Oceanic Technol, 22(1):30-42.