

文章编号: 2096-1618(2019)05-0475-07

# 多普勒天气雷达组网联合观测与数据融合

孙敏<sup>1</sup>, 王海江<sup>1</sup>, 何姣阳<sup>1</sup>, 李静<sup>2</sup>, 徐自励<sup>2</sup>, 王国强<sup>2</sup>

(1. 成都信息工程大学电子信息工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国民航局第二研究所, 四川 成都 610041)

**摘要:**各部天气雷达把共同覆盖区域的探测数据通过互联网传到终端服务器, 终端服务器再对联合观测数据进行处理和分析。对比分析了常用的插值算法和改进的自适应 Barnes 插值算法得到单部雷达的 CAPPI 资料。在自适应 Barnes 插值算法的基础上, 研究数据分布特点并设定平滑参数。采用多种常用的反射率拼接方法对多部雷达的 CAPPI 资料拼接后, 发现采用指数权重函数法具有优良的效果。实验表明, 具有各向异性的滤波的自适应 Barnes 插值算法能够得到效果更好的 CAPPI 数据。

**关键词:**平滑参数; 自适应 Barnes 插值; CAPPI; 反射率拼图

**中图分类号:** TN957.57

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2019.05.006

## 0 引言

新一代多普勒天气雷达是观测降水的主要探测工具之一, 具有很高的时间和空间分辨率。然而单部雷达的观测范围相对有限, 限制了雷达观测作用的进一步发展。根据雷达基数据的结构设定适合的插值方案, 并精确地拼接雷达组网的反射率资料是有效解决探测范围限制的主要途径。

2005年, 美国开展了雷达三维组网的研究并构建了区域尺度的雷达组网。国家强风暴实验室研究了一套四维动态网格系统以表示四维中的不连续数据<sup>[1]</sup>。Zhang<sup>[2]</sup>开发了一个区域反射率拼图系统用于对流尺度的天气预报模式。MARK A ASKELSON 等<sup>[3]</sup>讨论了将自适应 Barnes 插值算法运用在雷达资料插值上。同时, 中国学者也展开了雷达拼图的研究, 1989年张培昌讨论了单站 CAPPI 资料坐标系转化的问题。由于降水回波垂直分布的不均匀性, 在同一高度处的回波资料能够更好地反映雷达探测区域内的降水强度。其常用的插值方法有: 最近邻居法、垂直线性内插法、垂直水平线性插值法、三线性插值法和 Barnes 插值算法<sup>[4-5]</sup>。Trapp 等<sup>[6]</sup>使用理论方法近似与观测系统模拟试验, 研究了这些简单的分析方法的平滑和滤波特征。黄云仙等<sup>[7]</sup>将这些常用的插值方法和拼图方法作对比并分析。空间内插技术在雷达资料中应最小限度地平滑并尽可能地保留单部雷达资料中明显存在的原始回波结构特征<sup>[7-8]</sup>。Heymsfield 采用统计客观分析技术对反射率场进行了研究。

中国多普勒雷达站点布网的日益完善, 使得雷达观测资料的重要性和优越性更加突出<sup>[10-12]</sup>。有效地利用雷达组网的资料, 提高现代气象业务的发展水平是目前的气象工作者的构造重点。对多部天气雷达基本反射率进行拼接, 能够扩大探测范围、探测较大尺度的天气系统, 并且提高重叠区域的精度。在拼图网格中的资料重叠区域, 通常使用最大值方法、最近邻居法、反距离权重法、算数平均法等。根据雷达的扫描方式可以总结出雷达数据的分布的两个特性: 雷达数据的分布取决于方向; 雷达数据密度分布随着距离的增大而减小<sup>[13]</sup>。在空间上, 雷达反射率资料的空间分布是随着仰角的增大, 斜距的增加, 其空间分辨率越来越大。

将单部雷达的探测资料从球坐标系转换到的笛卡儿坐标系。并采用自适应 Barnes 插值方法将观测数据插值到均匀的空间网格点上, 从而获得各部雷达的 CAPPI (constant altitude plan position indicating) 数据。值得注意的是自适应 Barnes 插值方法中的平滑参数是按照数据分布特点去设置的。拼接多个雷达的 CAPPI 数据形成 3D 拼图网格, 得到高精度、高分辨率的反射率拼图数据。多雷达的数据分别经数据处理终端得到各个雷达的反射率 CAPPI 产品, 经终端服务器, 融合拼接得到多部雷达 CAPPI 融合产品其整体框图如图 1 所示。

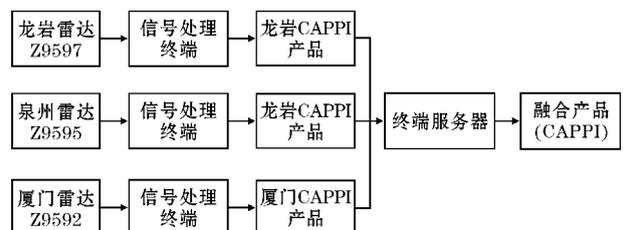


图 1 整体框图

收稿日期: 2019-07-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1733103); 四川省科技厅计划资助项目 (2018JZ0030)

## 1 资料选取

对于资料的选取,需要注意多部雷达的位置分布,以及数据时间的一致性。研究表明,在3部雷达做数据融合时,其位置越趋近于正三角形越有利于融合效果,并且雷达资料的时间差应该尽量的小,以保证数据融合的精度。采用福建省2019年3月4-8日共5天20个时间点的降水数据作为研究对象。并选取位于厦门、泉州、和龙岩的新一代多普勒天气CINRAD-SA\SB雷达Z9592、Z9595、Z9597提供同一时间的体扫数据(时间间隔小于5 min)。此3部CINRAD-SA\SB雷达的体扫模式为VCP21,其扫描方式为6分钟完成9个不同仰角上的PPI(plan position indicator)扫描。仰角范围是 $0.5^\circ \sim 19.5^\circ$ 。其径向上的距离库长度是250 m,最大距离库数为920。此3部雷达位置参数如表1所示。

表1 雷达位置参数

雷达编号	经度	纬度	高度/km
Z9592	118.08	24.48	0.19
Z9595	118.49	24.89	0.531
Z9597	117.08	25.05	1.50

## 2 网格点处理

天气雷达在观测时,雷达波束在各个仰角进行锥形扫描。因此雷达回波数据是以雷达为极点的极坐标系(仰角,方位角,斜距)的形式存储。体扫数据的空间分辨率是随着仰角、斜距的增大而增加的。将空间散乱分布的原数据统一到分辨率均匀的空间网格中是有必要的。在水平和垂直方向分别设置均匀的网格,其水平分辨率 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ ,其垂直分辨率为1 km ( $2 \sim 6\text{ km}$ )。将球坐标系下的网格点转换到笛卡儿坐标系(经度,纬度,高度),用于多部雷达CAPPI产品的拼图以及显示。对于一个任意高度的网格点,其地球表面的铅直投影点到雷达站的弧长为 $L$ ,则

$$L = R \times \sin^{-1} \frac{r}{R+h} \approx r \quad (1)$$

$$\varphi = \varphi_0 + y/D_\varphi \quad (2)$$

$$\lambda = \lambda_0 + x/D_\lambda \quad (3)$$

其中: $R$ 是地球半径, $h$ 是网格点的高度, $\varphi_0$ 、 $\lambda_0$ 为雷达站的纬度和经度, $D_\varphi$ 为单位纬度所跨的弧长, $D_\lambda$ 为单位经度所跨的弧长, $x$ 、 $y$ 分别是网格点与雷达站的水平和垂直距离, $\varphi$ 、 $\lambda$ 为网格点的纬度和经度。

## 3 插值算法

雷达以一定的仰角进行扫描时获得资料实际并不是处在同一平面极坐标系下,而是以球坐标形式处在3维空间中。对多部雷达在同一高度的反射率资料进行拼图时,应该获得单部雷达的CAPPI资料。将对双线性插值法、最邻近法、8点线性插值法和自适应Barnes插值法进行对比分析。

### 3.1 最近邻居法

在三维空间之中,用距离网格单元最近的距离库来填充网格单元。基于网格单元中心与雷达距离库中心的距离。

### 3.2 径向和方位上的最近邻居法和垂直线性内插法(NVI)

在径向和距离库上采取最近相邻法,如图2所示。待插值的网格点所方位角确定了该网格点的两条相邻径向( $a_i, a_{i-1}$ ),根据网格点与雷达的距离,可以确定网格点落在两个相邻的距离库之间。根据网格点所在的梯形区域来判断其相邻的径向及其所在距离库。图3表示了在垂直方向的线性内插细节。其中, $e$ 位于相邻仰角 $e_1$ 和 $e_2$ 之间。在径向和方位上采用最近邻法, $L_1$ 和 $L_2$ 是经过极点的竖直平面与相邻仰角层相交的轴线,将轴线赋予最近邻的径向波束数据。

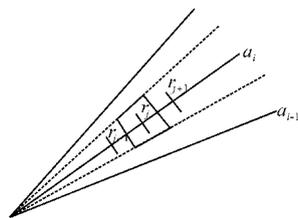


图2 径向和方位上的最近邻法

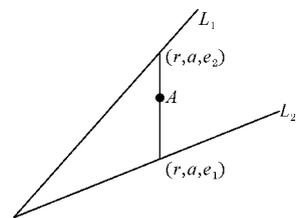


图3 垂直方向上的线性内插

### 3.3 8点线性插值法

8点插值法原理见图4。网格点 $f_0(r_0, a_0, e_0)$ 落在的 $f_k$ 围成的四棱柱内,其中四棱柱的8个顶点 $f_1(r_1, a_1, e_1)$ 、 $f_2(r_2, a_1, e_1)$ 、 $f_3(r_1, a_2, e_1)$ 、 $f_4(r_2, a_2, e_1)$ 、 $f_5(r_1, a_1, e_2)$ 、 $f_6(r_2, a_1, e_2)$ 、 $f_7(r_1, a_2, e_2)$ 、 $f_8(r_2, a_2, e_2)$ 是网格

点近邻的仰角层、方位角、距离库的值。将该 8 个点作为网格单元的影响点,进行双线性插值得到网格单元格的值。

$$f_0 = w_{e1} [(w_{r1}f_1 + w_{r2}f_2)w_{a1} + (w_{r1}f_3 + w_{r2}f_4)w_{a2}] + w_{e2} [(w_{r1}f_5 + w_{r2}f_6)w_{a1} + (w_{r1}f_7 + w_{r2}f_8)w_{a2}] \quad (4)$$

其中,方位上的内插权重为

$$\begin{cases} w_{a1} = (a2 - a) / (a2 - a1) \\ w_{a2} = (a - a1) / (a2 - a1) \end{cases} \quad (5)$$

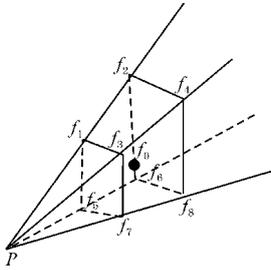


图 4 8 点插值法原理示意图

### 3.4 自适应 Barnes 插值

自适应 Barnes 插值具有方向分裂和自动适应数据密度的特性,可表示为

$$f_0 = \frac{\sum_{k=1}^N w_k f_k}{\sum_{k=1}^N w_k} \quad (6)$$

其权重  $w_k$  可表示为

$$w_k = \begin{cases} \exp\left[-\frac{(R_k - R_0)^2}{K_r} - \frac{(\theta_k - \theta_0)^2}{K_\theta} - \frac{(\varphi_k - \varphi_0)^2}{K_\varphi}\right] & (f_k \text{ 为有效值}) \\ 0 & (f_k \text{ 为无效值}) \end{cases} \quad (7)$$

其中  $R_k, \varphi_k, \theta_k$  为  $f_k$  所对应的极坐标。 $K_r, K_\varphi, K_\theta$  分别为径向距离、方位角、仰角方向的平滑参数,可以对它们进行参数调整,以达到不同的平滑效果。确定 Barnes 平滑参数的方案有两种,第一种常用方案是将各个方向上的平滑系数设为固定的值,即在各个方向上才用固定的平滑效果,类似于产生具有各向同性的滤波器的效果。前人在使用 Barnes 插值算法对反射率进行插值时,基本上都是使用固定的平滑参数,没有充分考虑反射率数据的分布特点,滤波效果不够精细。且平滑参数是根据最小密度方向上的数据密度来选择的,这可能会导致在其他方向上收集的信息被解释为过度平滑。为了解决平滑性能的问题,提出了第二种平滑方案,即按照径向、方位角、仰角的结构关系得到各个方向的平滑参数的关系式,从而实现各向异性滤波器效果,对于不同的网格点的平滑参数是不相同的。根据雷达数据的分布特性,Mark A 将回波采样分解为如图的方位角  $\hat{e}_\varphi$ ,仰角  $\hat{e}_\theta$ ,径向  $\hat{e}_r$  方向,并对不同的方

向使用不同的平滑参数。平滑参数按照数据坐标来设定,并根据分析点的坐标而变化,会造成权重函数的形状以及滤波特性的是不确定的。

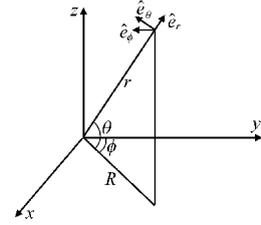


图 5 气象雷达的坐标系

图 5 中  $r$  为径向距离,  $\theta$  是仰角,  $\varphi$  为方位角。 $\hat{e}_\varphi, \hat{e}_\theta, \hat{e}_r$  分别是方位角、仰角、径向方向上的矢量。第一种平滑参数设计方案虽然能构造根据雷达数据密度分布的平滑参数,但并没有结合雷达数据分布的两个特点,特别是第二个特点。在第二个方案中,根据分析点的坐标和数据的空间结构关系构造平滑参数,有

$$k_r = R^2 \times k_\varphi \quad (8)$$

$$k_\theta = \cos^2 \theta \times k_\varphi \quad (9)$$

通过固定  $k_r, k_\varphi, k_\theta$  其中一个参数,剩下的两个参数通过公式可以得到。平滑参数是不固定的,和样本点的位置的坐标相关,随其变化的。在不同的情形中,根据数据的空间分布特性以及观测者的目标,选择固定不同的参数。数据间隔在 3 个方向上的依赖性是不同的,因此根据 3 个方向的依赖性设置平滑参数是有必要的。同一径向上的样本点之间的间隔是固定的 (250 m),而方位角方向的数据间隔是随着径向距离和仰角的增大而变大的。仰角方向的数据间隔随着仰角以及相邻仰角差的变化而变化的。如果固定  $k_r$ ,再通过公式得到  $k_\varphi, k_\theta$  时,类似于第一种方案产生各向同性滤波的 Barnes 权重函数,没有考虑数据分布属性,使得自适应 Barnes 滤波器优于固定的,各向同性的滤波器。当固定  $k_\varphi$  的值时,将根据数据在方位角方向上的分辨率对仰角和径向上的分量进行滤波。方位角分量在相同仰角,不同距离上获得同样的滤波效果。相同投影距离上,高仰角更平滑。同理而言,当固定  $k_\theta$  的值时,将根据数据在仰角方向上的分辨率对方位角和径向上的分量进行滤波。在同仰角,不同距离滤波效果相同。相同距离,低仰角比高仰角更平滑。总体来说,如果仰角方向上的数据间隔远大于方位角上的间隔时,选用固定  $k_\theta$  的方案更适合。

## 4 插值算法对比分析

采用福建省龙岩市 Z9597 雷达在 2019 年 3 月 8 日上午 11 点 33 分探测的回波数据,分别使用自适应

Barnes 插值算法和其他常用方法(最邻近法、NVI、8点线性插值法)得到2 km高出的 CAPPI 资料。主要从两方面来比较插值算法的优劣:一方面是从生成图像的平滑度,连续性等直观角度进行比较;另一方面是强降水区域位置的比较。

最近邻法是由距离待插值网格点最近的数据来填充网格的。这种方案会造成如图 6(a)中的环状突变的情况,存在较大的误差。很容易受到噪声的影响,稳定性较低,受原数据间隔和数据质量的影响很大。NVI 是根据径向和方位上的位置关系以及垂直方向上的线性关系来确定网格单元的值。该算法考虑的是出于两个仰角之间的网格点,在处于第一个仰角之下的网格点需要额外处理。在低于最小仰角层的网格,采用最近邻法。从图 6(b)看出,NVI 插值法得到的 CAPPI 图像在边缘部分的网格点数据丢失,并且依旧存在环状突变。虽然整体优于最近邻法,但仍旧在细节方面存在较大误差。8点插值法在强降水区域的大小和强度与其他方法一致,总体效果较好,较完整的考虑了待插值点周围的点对其的影响,具有一定的稳定性和抗噪性。需要指出的是,8点插值法并未在插值过程中对插值数据进行平滑操作,在图中细节处可以看出,存在很多零散的噪点。CINRAD-SC 雷达扫描的仰角范围为 $0.5^{\circ} \sim 19.5^{\circ}$ ,而同一仰角层的方位角的间隔约等于 $1^{\circ}$ ,因此采用固定 $k_{\theta}$ ,再通过公式计算 $k_r$ , $k_{\phi}$ 的值。将3个方向的平滑参数按照空间结构设置,使得整体平滑性更好,使其 CAPPI 的平滑性和抗噪性更好,强降水区域突出明显。由相邻仰角,径向,方位角所决定的8个邻近点的距离库作为影响点,使得插值准确性较高。

## 5 均值偏差筛选

雷达拼图的关键在于参与拼图的各雷达的 CAPPI 数据的准确性和可信性,以及拼图算法的选用。为此,一方面要采用适合拼图算法,另一方面对参与拼图的数据进行筛选。雷达资料的质量取决于雷达的发射和接收性能、雷达系统的精确定标、恰当的数据获取和产品生成技术以及产品生成过程中有效的资料质量控制。在多个雷达扫描重合区域可能会出现在3部雷达数据在相同网格点的反射率相差较大。造成这个现象的原因之一是各雷达的参数不同造成探测同一目标时,反射率因子会有较大差别。另一个原因是网格点距离各个雷达的距离的不同。也不排除因为其他外界因素和雷达自身硬件问题对其造成影响。为解决此问题,采用3部具有相同参数的 CINRAD-SC 雷达,并且

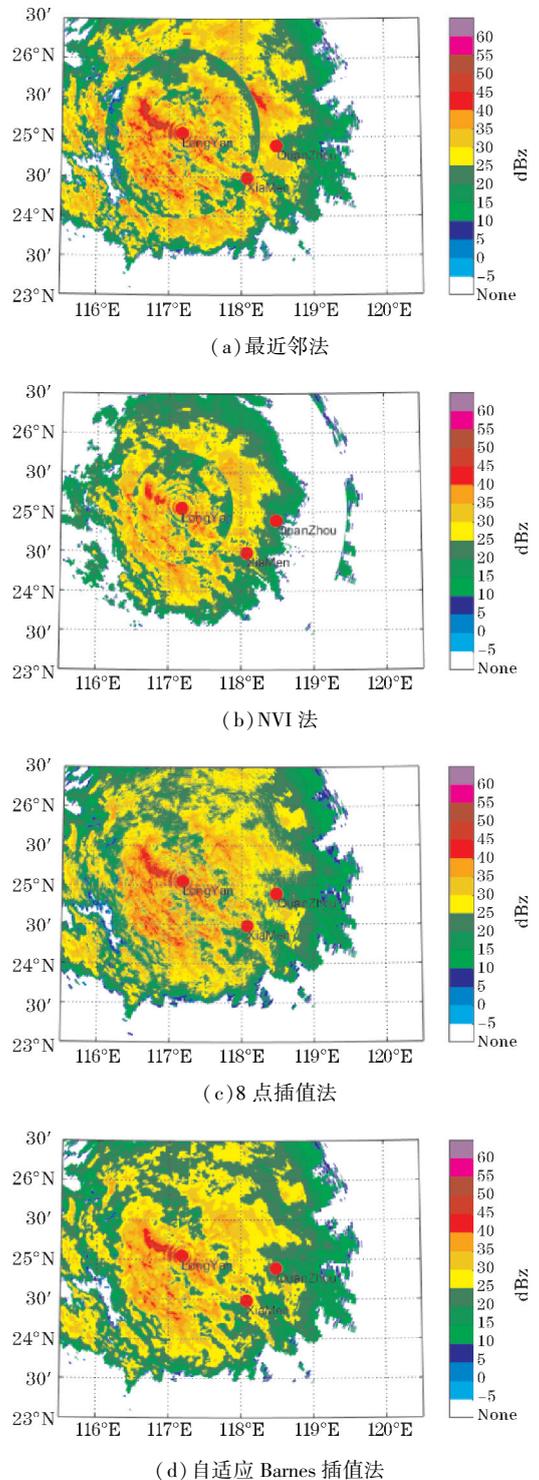


图6 单部雷达 CAPPI 图

将多部雷达的数据都统一在同一个网格下运用统计学的思路,去除误差较大的数据。将多个雷达在同一网格点的数据存在  $P$  序列中。计算序列中各个数据的均值偏差:

$$dv_i = P_i - avP \quad (10)$$

$$avP = \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{N} \quad (11)$$

式中, $N$  为在同一网格单元的数据个数, $P_i$  为序列

$P$  中的元素,  $avP$  为序列  $P$  的均值,  $dv_i$  是数据的均值偏差。设置均值偏差阈值  $M$ , 若  $dv_i > M$ , 则表示该数据存在问题, 并从序列中删除该元素; 否则保留该数据。

## 6 反射率数据拼接

将来自多个雷达的网格点反射率数据拼接起来, 高精度地反映大范围的反射率数据。针对多部雷达都覆盖的区域, 需要采用适当的融合方法对其进行数据融合, 以提高最终结果的准确度。主要的方法有:

### 6.1 最近邻近法

最近邻近法是在拼图过程中, 将最靠近网格单元的雷达分析值赋值给网格单元。该方法产生的结果不准确, 而且在多部雷达中若是存在质量稍差的雷达数据, 其误差很大。

### 6.2 最大值法

最大值法是将多个雷达在同一网格单元的分析值做比较, 取最大的值赋值给网格单元。其优点是简单易实现, 但是会在数据重叠区域产生误差。

### 6.3 指数权重函数法

权重函数法是基于网格点与雷达站之间的距离, 权重函数有多种。指数权重函数法加权平均法即所有网格点乘以其指数权重的和, 再除以所有网格点权重的总和。经过筛选, 我们采用指数权重函数法, 其融合表达式如下:

$$Z = \frac{\sum_{n=1}^N w_n \times Z_n}{\sum_{n=1}^N w_n} \quad (12)$$

式中,  $N$  为覆盖该区域雷达的个数,  $w_n$  为权重参数, 其可以表示为

$$w_n = e^{-\frac{r_n^2}{R^2}} \quad (13)$$

式中,  $r$  为距离雷达站的距离,  $R = 100$ 。

## 7 拼图结果验证

分别使用最近邻法, 最大值法以及改进的自适应 Barnes 插值算法对 2019 年 3 月 8 日上午 11 点 33 位于厦门的 Z9592、位于泉州的 Z9595、和位于龙岩的 Z597 数据进行实验, 并对多部雷达在 2 Km 高度的 CAPPI 图像进行拼接。虽然个别雷达的资料在某些径向上有问题, 并且可以通过多部雷达数据的融合来剔除问题数据, 并不影响拼图效果。总体可以看出改进的自适应 Barnes 插值方法能够实现良好的效果, CAPPI 图像光滑连续没有明显的突变。图 7 为各部雷达采用该平滑参数的自适应 Barnes 插值方法的 CAPPI 图像。其中, 图 7 (b) 的边缘部分存在孤立的回波的主要原因是由于在 Barnes 插值过程中, 采用的是相邻的 8 个点作为影响点。然而当低仰角数据缺损时, 会出现其影响数据多为无效数据。最邻近法在雷达共同覆盖区域选择距离最近的雷达的 CAPPI 数据来填充网格单元。这种处理方式导致数据的不连续, 产生突变, 如 8 (a) 图中 (118°E, 26°N) 附近有明显的垂直断面。最大值法在雷达共同探测区域在每一个网格单元取 3 部雷达在此处最大的值来填充, 如图 8 (a) 所示该方法使得共同覆盖区域数据普遍增大, 未能引入距离条件, 忽略了由探测距离增加而引起的探测准确度降低的情况。并且在边缘附近存在间断突变情况。指数权重法进行拼接使得在共同覆盖区域近雷达的数据的权重较大, 远离雷达的数据所占的权重较小。将各雷达的指数权重与数据结合之后, 拼图图像有效融合, 强降水位置以及降水强度与单部雷达 CAPPI 数据相吻合。在非共同覆盖区域, 经过数据筛选的拼图相较于单部雷达并未发生过平滑以及边缘模糊的现象, 反而将个别异常的数据剔除。多部雷达联合探测弥补了单部雷达探测范围小, 探测精度不足, 以及在远距离或遮挡物而影响数据质量的问题。如图 7 (b) 中泉州雷达在北方上的数据存在条状的断面, 经过拼图后, 该区域连续平滑。

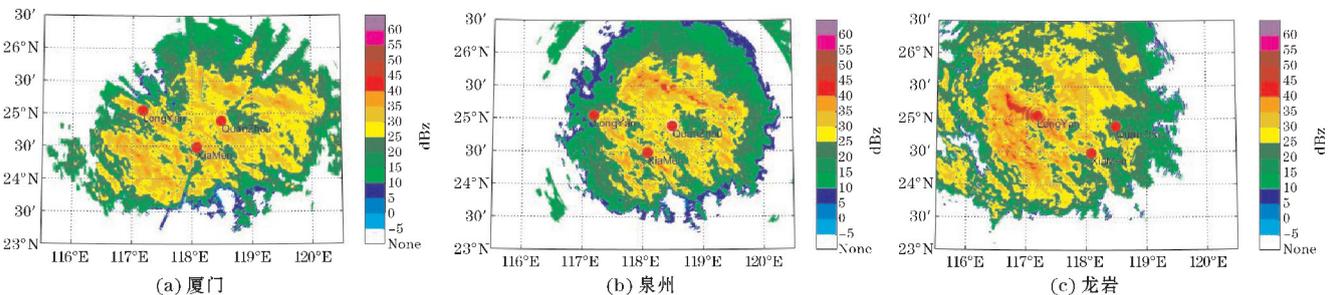


图 7 单部雷达 CAPPI 图

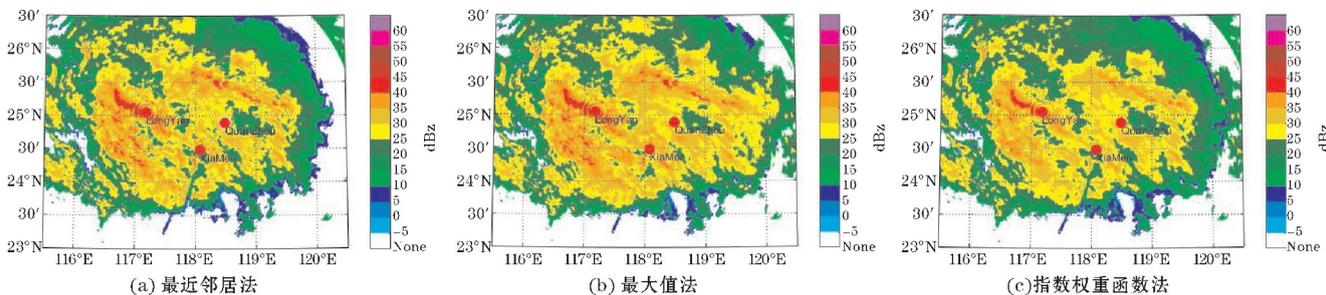


图8 多部雷达拼图

## 8 结束语

研究了自适应 Barnes 插值算法中的平滑参数的设置方案,并提出一种具有各向异性滤波的方案,使插值结果更具稳定性,减少过度平滑的产生。此外还涉及雷达反射率资料的网格化,雷达共同覆盖区域的求取,以及多部雷达拼图处理等操作。对比分析了最近邻近法,垂直线性插值法和改进的自适应 Barnes 插值的生成的 CAPPI 图像。结果表明采用根据数据空间分布特点而变化的平滑参数的各向异性滤波的 Barnes 插值算法得到的 CAPPI 图像更能够完整地表达雷达探测数据的特征。在准确插值的同时使得组网拼图数据具有一定的抗躁性。对多部雷达的 CAPPI 资料进行均值偏差筛选,滤除无效数据。还研究了改进的自适应 Barnes 插值下,将 3 部天气雷达的反射率 CAPPI 资料利用指数权重函数法进行融合。结果发现:采用指数权重函数法使得 CAPPI 拼接图像重叠区域吻合度高,与实际情况吻合。

致谢:感谢成都市科技项目产业集群协同创新项目(2016-XT00-00015-GX)对本文的资助

## 参考文献:

- [1] Serafin R J, Wilson J W. Operational Weather Radar in the United States: Progress and Opportunity [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2008, 81(3): 501-518.
- [2] Zhang J, Howard K, Langston C. Three-and Four-Dimensional High-Resolution National Radar Mosaic [J]. Proceedings of Erad, 2004: 105-108.
- [3] Askelson M A, Aubagnac J P, Straka J M. An Adaptation of the Barnes Filter Applied to the Objective Analysis of Radar Data [J]. Monthly Weather Review, 2010, 128(9): 3050-3082.
- [4] Jay Miller L, Mohr C G, Weinheimer A J. The Simple Rectification to Cartesian Space of Folded Radial Velocities from Doppler Radar Sampling [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2013, 3(1): 162-174.
- [5] Mohr C G, Vaughan R L. An Economical Procedure for Cartesian Interpolation and Display of Reflectivity Factor Data in Three-Dimensional Space [J]. Journal of Applied Meteorology, 1979, 18(5): 661-670.
- [6] Trapp R J, Doswell C A I. Radar Data Objective Analysis [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2000, 17(2): 105-120.
- [7] Huang Y X, Zhang Y. Comparison of Interpolation Schemes for the Doppler Weather Radar Data [J]. Remote Sensing Information, 2008, 21(2): 39-45.
- [8] Barnes S L. A Technique for Maximizing Details in Numerical Weather Map Analysis [J]. Journal of Applied Meteorology, 1964, 3(4): 396-409.
- [9] Heymsfield G M. Statistical Objective Analysis of Dual-Doppler Radar Data from a Tornadoic Storm [J]. Journal of Applied Meteorology, 2010, 15(15): 59-68.
- [10] Askelson M A, Aubagnac J P, Straka J M. An Adaptation of the Barnes Filter Applied to the Objective Analysis of Radar Data [J]. Monthly Weather Review, 2000, 128(9): 3050-3082.
- [11] Wurman J, Heckman S, Boccippio D. A Bistatic Multiple-Doppler Radar Network [J]. Journal of Applied Meteorology, 1993, 32(12): 1802-1814.
- [12] Doswell, Charles A. Obtaining Meteorologically Significant Surface Divergence Fields Through the Filtering Property of Objective Analysis [J]. Monthly Weather Review, 1977, 105(7): 885-892.
- [13] Lakshmanan V, Humphrey T W. A MapReduce Technique to Mosaic Continental-Scale Weather Radar Data in Real-Time [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations

- and Remote Sensing,2014,7(2):721-732.
- [14] Langston C,Zhang J,Howard K. Four-Dimensional Dynamic Radar Mosaic[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology,2007,24(5):776-790.
- [15] Lakshmanan V,Smith T,Hondl K, et al. A Real-Time, Three-Dimensional, Rapidly Updating, Heterogeneous Radar Merger Technique for Reflectivity, Velocity, and Derived Products [J]. Weather and Forecasting, 2006,21(5):802-823.
- [16] Zhang J, Howard K, Gourley J J. Constructing Three-Dimensional Multiple-Radar Reflectivity Mosaics: Examples of Convective Storms and Stratiform Rain Echoes[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology,2005,22(1):30-42.
- [17] Jorgensen D P,Hildebrand P H,Frush C L. Feasibility Test of an Airborne Pulse-Doppler Meteorological Radar[J]. Journal of Applied Meteorology,1972,22(5):744-757.
- [18] Shapiro A,Robinson P,Wurman J, et al. Single-Doppler Velocity Retrieval with Rapid-Scan Radar Data[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology,1925,20(12):1758-1775.
- [19] Pauley P M,Wu X. The Theoretical, Discrete, and Actual Response of the Barnes Objective Analysis Scheme for One-and Two-Dimensional Fields[J]. Monthly Weather Review,1990,118(5):1145-1164.
- [20] Liu J P. Primary Study on Three-dimensional Gridding Weather Radar Data and CINRAD Mosaic [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2010.
- [21] Xiao Y J,Liu L P. Study of methods for interpolating data from weather radar network to 3-D grid and mosaics [J]. Acta Meteor Sinica, 2006, 64(5):647-656.

## Joint Detection Doppler Weather Radar Network and Data Fusion

SUN Min<sup>1</sup>, WANG Haijiang<sup>1</sup>, HE Jiaoyang<sup>1</sup>, LI Jing<sup>2</sup>, XU Zili<sup>2</sup>, WANG Guoqiang<sup>2</sup>

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. The Second Research Institute of CAAC, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The detection data of the common coverage area are sent to the terminal server through the Internet, and then the terminal server processes and analyzes the joint observation data. In this paper, the methods of interpolating reflectivity volume scan data into the grids in the Cartesian coordinate system and three-dimensional mosaic for gridded reflectivity data of several radars are studied. The smoothing parameters of adaptive Barnes interpolation are improved. Through comparison of CAPPI images obtained by the commonly used interpolation schemes and the improved adaptive Barnes interpolation, it was found that the latter can provide consecutive reflectivity fields and retain high-resolution structure comparable to the raw data. The mean deviation filter is adopted to screen grid data and the data are fused by various fusion method. Result shows that index weight function is an excellent method which can provide continuous three-dimensional reflectivity mosaic data.

**Keywords:** smoothing parameters; adaptive Barnes interpolation; CAPPI; reflectivity mosaics