

新一代天气雷达网资料的三维格点化 及拼图方法研究^{*}

肖艳姣^{1,2,3} 刘黎平¹

1 中国气象科学研究院,灾害天气国家重点实验室,北京,100081

2 南京信息工程大学,南京,210044

3 中国气象局武汉暴雨研究所,武汉,430074

摘 要

文中研究了几种把球坐标系下的雷达网反射率体扫资料插值到统一的笛卡尔坐标系下的经纬度网格上以及用多个雷达的反射率网格资料进行三维拼图的方法,并对多个雷达同步观测的反射率因子的空间一致性、系统误差以及雷达等距离线上回波的水平和垂直结构进行了分析。结果发现:在雷达资料格点化过程中,径向和方位上的最近邻居法和垂直方向的线性内插法的结合(NVI方法)是一种有效的雷达资料分析方法,它既能得到空间比较连续的反射率分析场,同时也较好地保留了体扫资料中原有的反射率结构特征;广州雷达和梅州雷达同步观测的空间一致性比较好;在多个雷达资料合成拼图的过程中,距离指数权重平均法能提供空间连续的三维反射率拼图数据,拼图也减轻了由雷达波束几何学引起的各种问题。

关键词: 雷达网, 反射率, 三维拼图, NVI 内插方法, 距离指数权重平均。

1 引 言

新一代天气雷达有很高的时间和空间分辨率,这使其在中尺度气象研究中具有其他观测资料无可比拟的优越性^[1-2]。然而,地面固定的单部雷达的探测范围有限,不足以覆盖更大尺度的天气系统,例如梅雨锋、台风、飑线等。这一缺陷阻碍了我们进一步揭示与这些天气系统相关的大气运动的各种规律以及各种尺度之间的相互作用,使我们无法对这些系统的发生发展机理做出全面、客观、细致的研究。各级气象局所负责的天气监测与预警区域也往往需要多个雷达探测范围来覆盖。因此,为了提高对中尺度灾害性天气的研究以及预警能力,发挥多部雷达在联合监测天气中的作用,就必须把来自多部雷达的资料进行组网拼图。由多个雷达重复取样获得的天气信息要比只由单个雷达取样获得的更加精确,还可以很大程度解决因单部雷达观测的波束几

何学原因(例如,静锥区、波束展宽、波束高度、波束阻挡等)引起的很多问题。推动风暴尺度天气预报研究的主要动力就是这些天气雷达网的大范围探测前景^[3-4]。

国外的雷达拼图业务工作开展较早,如美国的 WSR-88D 雷达网的(组合)反射率拼图(每 15 min、分辨率约 10 km)。国内从“七五”开始常规数字化雷达拼图业务研究^[5]。随着中国新一代天气雷达网的部署,雷达拼图技术得到进一步发展,中国及区域新一代天气雷达实时拼图业务已进行了 4 年的试验运行,武汉、上海、广东等地也相继完成了高频次的区域雷达拼图工作并投入业务应用。然而,这些雷达拼图只是用低仰角的 PPI 产品或其他新一代天气雷达产品进行的只有 16 等级数据的二维拼图,只能作为天气过程的定性分析工具,不适合新一代天气雷达拼图数据的再分析应用。随着 Internet-2 和有效的数据压缩技术的到来,把来自新一代天气

^{*} 初稿时间:2005 年 11 月 2 日;修改稿时间:2006 年 2 月 15 日。

资助课题:国家重大基础研究项目(2004CB418305)和国家自然科学基金项目(40375008)。

作者简介:肖艳姣,女,1971 年生,副研究员,主要从事雷达探测技术研究。

雷达网的全分辨的体积扫描资料实时传输到某个中央站已成为可能。最近, Zhang 等^[6]已为定量降水估算、对流尺度数值天气预报模式的资料同化以及其他用途开发了 3-D 多雷达拼图。美国国家强风暴实验室(NSSL)也设计了一个 4-D 动态网格算法(4DDG)^[7]精确快速地把雷达资料插到给定的 4-D 空间。

由于雷达作立体观测时, 雷达波束是在各个仰角沿方位进行径向扫描, 因此, 原始雷达观测资料常用球坐标系(仰角、方位和斜距)来存储, 而在综合分析雷达资料和其他观测资料(例如卫星)时或拼接来自多个雷达的资料时, 使用球坐标系存储的雷达资料十分不方便。因此, 必须把球坐标系下的全分辨的雷达资料内插到统一的笛卡尔坐标系下的 3-D 网格点上。前人已提出多种插值方法, 常用的方法有: (1) 最近邻法^[8], (2) 线性内插法^[9-11], (3) Cressman 权重方法^[12], (4) Barnes 方法或指数权重方法^[13-14]。Trapp 等^[15]和 Askelson 等^[14]使用理论近似与观测系统模拟试验研究了这些简单分析方法的平滑和滤波特征。更复杂的分析方法包括统计方法^[16]和变分方法^[17]。大多数笛卡尔内插方法都是为具体的研究应用而提出, 在那些分析方法中, 参数往往都取决于应用的目的。Zhang 等^[6]认为空间内插技术在雷达资料分析应用中应最小限度地平滑并尽可能地保留单雷达资料中明显存在的原始回波结构特征。拼接多部雷达网格资料时, 在多个雷达资料重叠的区域也可采用上述那些插值方法进行处理。

本研究的目的是找到一种分析方法在尽可能地保留原始反射率结构特征的情况下, 快速地把球坐标系下的雷达体积扫描数据内插到统一笛卡尔坐标系下的 3-D 经纬度网格点上, 并把多雷达网格数据合成高时、空分辨率的 3-D 拼图数据, 为新一代天气雷达资料的深度和广度应用(如用于数值预报模式的资料同化、区域灾害性天气监测、临近预报以及水文和航空领域等)打下基础。

2 雷达反射率资料格点化

雷达资料的空间分辨率很不均匀, 对 CINRAD-SA 型雷达来说, 反射率资料在径向上的分辨率总是 1 km; 在方位上的分辨率随斜距线性增加, 在大约 75 km 处为 1 km; 在仰角方向的分辨率随斜距和仰

角增大而增加, 在第 5(6) 个仰角以上, 在 30(15) km 以远, 反射率资料的仰角方向的分辨率就大于 1 km。当仰角低于 20° 时, 垂直方向的分辨率可用仰角方向的分辨率近似。同一高度相邻仰角的反射率资料之间的水平间隔非常大, 其大小与高度和仰角有关, 例如, 0.5 和 1.5° 波束轴线在 4 km 高度的水平间隔达 77 km。雷达反射率资料格点化就是要将球坐标系下的空间分辨率不均匀的雷达资料插值到统一的笛卡尔坐标系下形成空间分辨率均匀的网格点资料, 并且在内插中尽可能保留原始体扫资料中原有的反射率结构特征。

为了方便雷达资料的 3-D 组网, 我们利用笛卡尔坐标系下网格点的经度、纬度和高度计算其在球坐标系中的仰角、方位和斜距, 然后根据计算出的仰角、方位和斜距在雷达球坐标系中的位置, 利用内插方法给该网格点赋值, 得到该网格点上的分析值。笛卡尔坐标网格在垂直方向共 21 层, 高度为 17 km, 5 km 以下的垂直分辨率为 0.5 km, 5—17 km 的垂直分辨率为 1 km, 网格点在水平方向的经纬度分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ (约 1 km $\times$ 1 km)。这样垂直分层的原因是在 5 km 以下(0.5° 仰角的斜距在 230 km 以内), 雷达资料的空间密度比较大, 所以垂直分辨率取得高一些, 而在 5—17 km 高度(0.5° 仰角的斜距在 230—460 km), 雷达资料的空间密度比较小, 所以垂直分辨率取得低一些。

2.1 插值方法

本文使用了 4 种方法把球坐标系下的雷达反射率值内插到笛卡尔坐标系下的经纬度网格点上。

(a) 最近邻法(NN)

在 3-D 空间中, 用最靠近网格单元的雷达距离库的值去填充网格单元的值, 该方法基于网格单元的中心与雷达距离库中心的距离。

(b) 径向和方位上的最近邻法 and 垂直线性内插法(NVI)

如图 1 所示, (r, a, e) 是某一网格点在雷达球坐标系中的位置, r 为斜距, a 为方位角, e 为仰角。 e 位于其上下相邻仰角 e_2 和 e_1 之间。 (r, a, e_2) 和 (r, a, e_1) 分别是经过该网格点的垂线(仰角低于 20° 时, 垂直方向可用仰角方向近似)与其上下仰角波束轴线的交点, 那么该网格点的分析值 $f^a(r, a, e)$ 可以用这两点的分析值 $f^a(r, a, e_2)$ 和 $f^a(r, a, e_1)$ 进行垂直线性内插得到, 即:

$$f^a(r, a, e) = [w_{e_1} f^a(r, a, e_1) + w_{e_2} f^a(r, a, e_2)] \cdot (w_{e_1} + w_{e_2})^{-1} \quad (1)$$

其中 w_{e_1} 与 w_{e_2} 分别是给予 $f^a(r, a, e_1)$ 和 $f^a(r, a, e_2)$ 内插权重:

$$w_{e_1} = (e_2 - e) / (e_2 - e_1) \quad (2)$$

$$w_{e_2} = (e - e_1) / (e_2 - e_1) \quad (3)$$

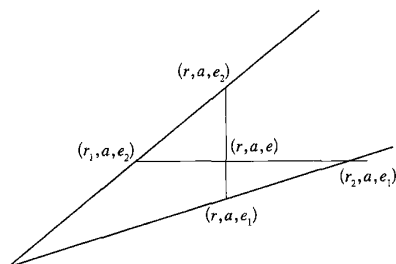


图1 垂直和水平线性内插示意图

Fig. 1 An illustration for vertically and horizontally linear interpolation between two tilts

$f^a(r, a, e_2)$ 和 $f^a(r, a, e_1)$ 分别等于最靠近点 (r, a, e_2) 和 (r, a, e_1) 的雷达距离库的观测值, 它们的获取采用了径向和方位上的最近邻居法。图2中 r_{i-1}, r_i, r_{i+1} 为相邻距离库, a_{j-1}, a_j, a_{j+1} 为相邻方位角, 两条虚线是波束的半功率线, 由半功率线和半距离库所围成的梯形区是距离库 r_i 的影响区, 在径向、方位方向上落在这个梯形区的点 (r, a) 的分析值 $f^a(r, a)$ 都用距离库 r_i 的观测值 $f^o(r_i, a_j)$ 来赋值, 即 $f^a(r, a) = f^o(r_i, a_j)$ 。

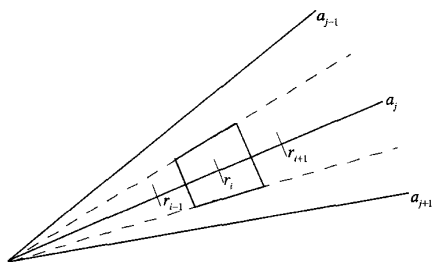


图2 径向、方位上的最近邻居示意图

Fig. 2 An illustration for the nearest radial and azimuthal neighbors

(c) 垂直水平线性内插法(简称VHI)

如图1所示, (r, a, e_2) 和 (r, a, e_1) 分别是经过网格点 (r, a, e) 的垂线(仰角低于20°时, 垂直方向

可用仰角方向近似) 与其上下仰角波束轴线的交点, (r_1, a, e_2) , (r_2, a, e_1) 分别是经过该网格点的水平线与其相邻上下仰角波束轴线的交点, 那么该网格点的分析值 $f^a(r, a, e)$ 可以用这4个点的分析值 $f^a(r, a, e_2)$, $f^a(r, a, e_1)$, $f^a(r_1, a, e_2)$, $f^a(r_2, a, e_1)$ 通过垂直和水平内插得到, 其中这4个点的分析值通过径向和方位的最近邻居法得到

$$f^a(r, a, e) = [w_{e_1} f^a(r, a, e_1) + w_{e_2} f^a(r, a, e_2) + w_{r_1} f^a(r_1, a, e_2) + w_{r_2} f^a(r_2, a, e_1)] / (w_{e_1} + w_{e_2} + w_{r_1} + w_{r_2}) \quad (4)$$

其中 w_{r_1} 和 w_{r_2} 分别是给予 $f^a(r_1, a, e_2)$ 与 $f^a(r_2, a, e_1)$ 的内插权重

$$w_{r_1} = (r_2 - r) / (r_2 - r_1) \quad (5)$$

$$w_{r_2} = (r - r_1) / (r_2 - r_1) \quad (6)$$

且有 $r_1 = r \sin e / \sin e_2$, $r_2 = r \sin e / \sin e_1$ 。

(d) 8点插值法(EPI)

某一网格点 (r, a, e) 落在由 $f_1^o(r_1, a_1, e_1)$, $f_2^o(r_2, a_1, e_1)$, $f_3^o(r_1, a_2, e_1)$, $f_4^o(r_2, a_2, e_1)$, $f_5^o(r_1, a_1, e_2)$, $f_6^o(r_2, a_1, e_2)$, $f_7^o(r_1, a_2, e_2)$, $f_8^o(r_2, a_2, e_2)$ 围成的锥体内(图3), 则该网格点的分析值 $f^a(r, a, e)$ 可由这8个点的观测值进行双线性内插获得。

$$f^a(r, a, e) = w_{e_1} [(w_{r_1} f_1^o + w_{r_2} f_2^o) w_{a_1} + (w_{r_1} f_3^o + w_{r_2} f_4^o) w_{a_2}] + w_{e_2} [(w_{r_1} f_5^o + w_{r_2} f_6^o) w_{a_1} + (w_{r_1} f_7^o + w_{r_2} f_8^o) w_{a_2}]$$

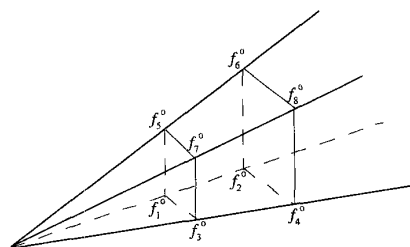


图3 8点内插示意图

Fig. 3 An illustration for eight point interpolation

其中 w_{a_1} , w_{a_2} 为方位内插权重

$$w_{a_1} = (a_2 - a) / (a_2 - a_1) \quad (7)$$

$$w_{a_2} = (a - a_1) / (a_2 - a_1) \quad (8)$$

2.2 插值方法和结果评估

彩图 4 给出了用上述 4 种方法内插得到的广州雷达观测的 2005 年 6 月 15 日 00:33 (世界时,下同) 的 4 km 和 8 km 高度的水平剖面以及 70° 方位的垂直剖面。从图中可看出用 NN 方法得到的 4 km 高度的水平剖面图上回波比较连续,而 8 km 高度的水平剖面图上出现了弧形不连续回波,在垂直剖面图上回波也不连续。这是因为 NN 方法只是把观测值的位置进行了移动,没有强加任何平滑,当观测值的空间分辨率较低时,就会出现回波不连续现象。而雷达观测值的空间分辨率随着高度和斜距,特别是随着高度的增加变得越来越低,因而回波不连续现象也越来越明显。用 NVI 方法得到的 4 km (图 4a₁—4d₁) 和 8 km (图 4a₂—4d₂) 高度的水平剖面以及垂直剖面图上的回波都比较连续,这是因为 NVI 方法在垂直方向采用了线性内插,保留了垂直方向的回波梯度。而相邻雷达观测值之间的间距在方位和斜距方向的间距比仰角方向的要小,因而在方位和斜距方向采用最近邻居法没有明显影响插值后的回波连续性,而是更加真实地保留了反射率资料的原有结构特征。VHI 方法在垂直和水平方向上都采用了线性内插,由于雷达观测值在水平方向上的间距非常大,因而水平方向的线性内插可能会引起回波在水平方向的扩展,强回波区的强度可能会变弱,弱回波区的强度可能会变强,垂直剖面图上的回波也因水平内插的权重而导致不连续现象。用 EPI 方法得到的结果与用 NVI 方法得到的结果非

常相似,由于 EPI 方法在径向、方位和仰角方向都采用了线性内插,所以得到的结果比 NVI 方法得到的结果更加平滑。

为了进一步比较 NVI 方法和 EPI 方法,我们用插值前后的分级总雨量作为衡量标准分析了这两种插值方法的效果。选取图 4a₁ 中 70° 方位的那块强回波作为分析区域,该区域中心距离雷达观测点约 60 km,1.5° 仰角的波束轴线在 2 km 高度正好穿过该区域,因此,用 1.5° 仰角的 PPI (插值前) 和用 NVI, EPI 方法得到的 2 km 高度的 CAPPI (插值后) 进行了 1 h 累积降水的估算。表 1 给出了用 PPI 方法得到的强降水区 (1 h 累积降水量 ≥ 30 mm) 的中心位置和分级总雨量与分别用 NVI, EPI 方法得到的强降水区的中心位置和分级总雨量之差。从表中可看出用 NVI 方法得到的强降水区的中心位置与 PPI 方法得到的一致,而用 EPI 方法得到的强降水区的中心位置与 PPI 方法得到的有一点偏差。相比 EPI 方法来说,用 NVI 方法得到的分级总雨量总体上与用 PPI 方法得到的分级总雨量之差要小一些,这说明 NVI 方法比 EPI 方法更能保留雷达体扫数据中原有的反射率结构特征。

通过以上分析,发现在把球坐标系下的雷达资料插值到笛卡尔坐标系下的细网格 (约 1 km $\times$ 1 km) 上时,用 NVI 方法既能得到空间比较连续的反射率分析场,同时也最好地保留了体扫资料中的原有反射率结构特征。

表 1 强降水区的中心位置和分级总雨量差 (与 PPI 方法相比)

Table 1 Differences in the center position and classified total rainfall of the strong precipitation area (the 1 h total rainfall from 0009 to 0109 UTC 16 June 2005 ≥ 30 mm) estimated by NHI and EPI in comparison with PPI method

	($\Delta x, \Delta y$) (km)	30—35 (mm)	35—40 (mm)	40—45 (mm)	45—50 (mm)	50—55 (mm)	55—60 (mm)	30—60 (mm)
PPI - NVI	(0, 0)	5	- 116	84	192	9	5	178
PPI - EPI	(- 1, 1)	321	- 67	- 164	144	113	61	408

3 多雷达同步观测反射率差异分析

用 NVI 方法把广州雷达和梅州雷达的球坐标资料插值到笛卡尔坐标系下的网格上后,对两雷达同步观测时的等高面上的等距离线 (只选取等距离线上任意雷达反射率因子大于 0 dBz 的区间) 上的反射率因子及反射率因子差进行了比较分析,目的是为了检查两个雷达同步观测的空间一致性和系统观测差。图 5 给出了 4 km 高度的广州雷达和梅州

雷达的覆盖范围示意图,其中 AB 线是两雷达的等距离线。只取两雷达等距离线上的反射率因子进行比较是为了排除不同的距离对两雷达观测差异的影响 (波束展宽、衰减)。

3.1 等距离线上的反射率水平剖面

图 6a 给出了 2005 年 6 月 20 日 03:04 广州 (GZ) 和梅州 (MZ) 雷达 4 km 高度等距离线上的反射率因子以及反射率因子差,其中横坐标为等距离线,长 2 08 km。从图中可看出,两雷达同步扫描时的空间

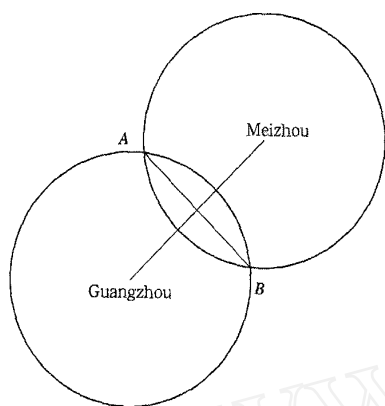


图 5 广州雷达和梅州雷达 4km 高度的覆盖范围示意图

Fig. 5 An illustration for the cover range of Guangzhou (GZ) radar and Meizhou (MZ) radar at 4 km height

一致性比较好,在两个雷达的反射率因子都连续大于 0 dBz 的区间,反射率因子差的算术平均为 0.5 dB,均方根为 2.8 dB。从图中还可看出两雷达同步扫描在方位上存在微小的差异,如果把广州雷达资料的方位逆时针旋转 1.2 后发现两雷达在等距离线上的空间一致性变得更好(如图 6b 所示),反射率因子差的算术平均变为 0.6 dB,均方根减小到 2.4 dB。此外,在等距离线的两端,分别有两个区间的广州雷达反射率因子在 0—30 dBz,而梅州雷达的反射率因子却接近 -33 dBz (-33 dBz 表示无回波),连续分析多个时次,都得到类似的结果,说明这可能是由于地形造成梅州雷达波束遮挡而引起的。

3.2 等距离线上的两个雷达反射率因子差的平均值随时间的变化

对两个雷达等距离线上的反射率因子差的平均值

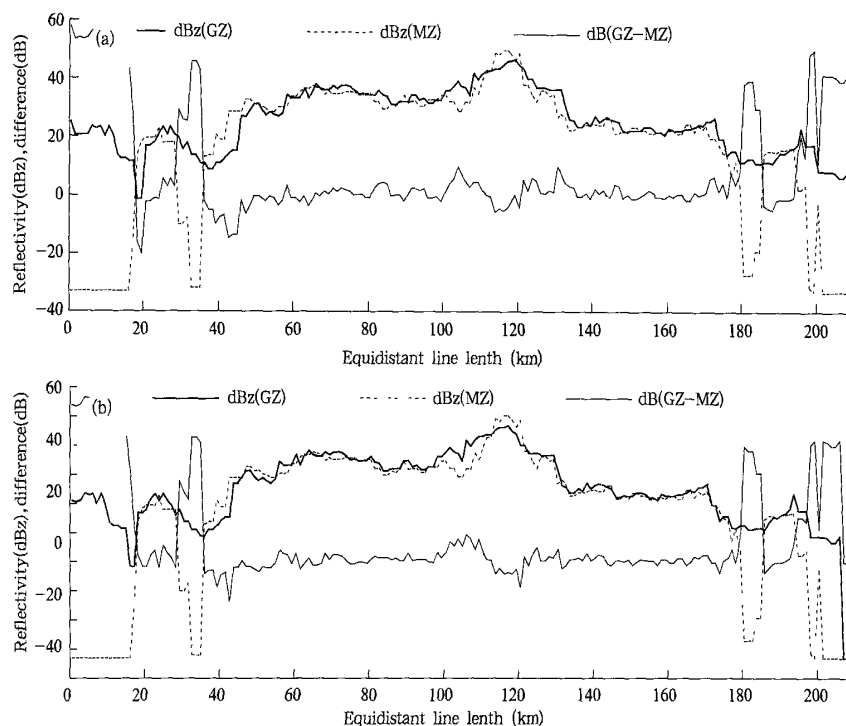


图 6 4 km 高度等距离线上的反射率及反射率差(广州和梅州雷达)
(a. 未校正 b. 方位校正)

Fig. 6 Reflectivity and its differences (GZ - MZ) on the equidistant line at the 4 km height at 0304 UTC 20 June 2005

随时间的变化进行了分析。图 7 给出了 2005 年 6 月 20 日 00:04—17:01 的 4 km 高度等距离线上的反射率因子差的平均值的时间序列。从图中可看出,广州雷达和梅州雷达在等距离线上的反射率因子差的算术平均几乎都在 -3—3 dB,均方根在 2—5 dB,算术平均和

均方根在这个时段内的平均值分别为 -0.47 和 3.2 dB。这说明两个雷达的随机观测差具有时间稳定性。

3.3 等距离线上的反射率垂直剖面

彩图 8 给出了 2005 年 6 月 20 日 03:04 广州 (GZ) 和梅州 (MZ) 雷达同步观测的 4 km 高度等距离线

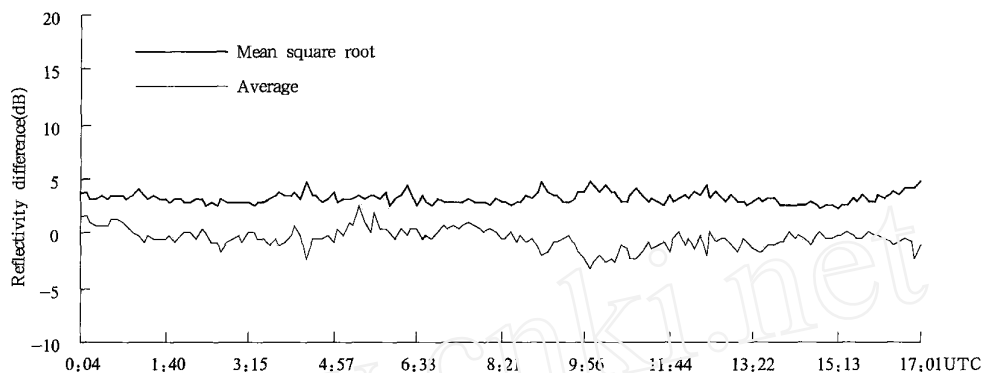


图 7 4 km 高度等距离线上的反射率差的平均值随时间的演变

Fig. 7 Temporal evolution of the average of reflectivity differences (GZ - MZ) on the equidistant line at 4 km height on 20 June 2005

上的反射率垂直剖面图,从图中可看出,两个垂直剖面图中的回波形状、水平位置、垂直高度非常一致,回波强度也大致相同,只是部分地方存在细小差别,这说明两个雷达同步观测的空间一致性比较好。

4 多雷达资料拼图

通过一个或多个客观分析方法把来自各个雷达的反射率场插值到统一的笛卡尔网格上之后,需要把来自多个雷达的格点反射率场拼接起来形成 3-D 拼图网格。在拼图网格的很多区域,特别是在对流层中高层,有来自多个雷达的资料重叠区,在拼图网格中的每个网格单元 i 的反射率值可以通过下面公式得到

$$f^m(i) = \sum_{n=1}^{N_{\text{rad}}} w_n f_n^a(i) / \sum_{n=1}^{N_{\text{rad}}} w_n \quad (9)$$

其中 $f^m(i)$ 是网格单元 i 的合成反射率值, $f_n^a(i)$ 是在网格单元 i 处来自第 n 个雷达的分析值, w_n 是给分析值 $f_n^a(i)$ 的权重, N_{rad} 是在网格单元 i 处有分析值的总的雷达个数。为了避免噪声的干扰,反射率小于 0 dBZ 的格点被认为是无回波的点。如果 $N_{\text{rad}} = 0$, 那么网格单元不被任何一个雷达覆盖,该网格单元的 $f^m(i)$ 被赋一个缺值符号。如果 $N_{\text{rad}} = 1$, 那么网格单元的值就等于那个雷达在该网格单元的值。如果 $N_{\text{rad}} > 1$, 那么就使用多个雷达分析值的权重平均。我们考虑并测试了 3 种拼图方法。

4.1 拼图方法

(a) 最近邻居法

最近邻居法就是把来自最靠近网格单元的那个雷达的分析值的权重赋为 1, 其他的权重全赋为 0, 即把最靠近网格单元的那个雷达的分析值赋给网格单元。

(b) 最大值法

最大值方法就是把覆盖同一网格单元的多个雷达反射率分析值中的最大值的权重赋为 1, 其他的权重全赋为 0, 即把覆盖同一网格单元的多个雷达反射率分析值中的最大值赋给网格单元。

(c) 权重函数法

权重基于单个网格单元和雷达位置之间的距离, 我们测试了两个权重函数: 指数权重函数和 Cressman 权重函数。

指数权重函数

$$w = \exp\left(-\frac{r^2}{R^2}\right) \quad (10)$$

其中 R 为适当的长度比例, 本文取 $R = 100$, r 为网格点到雷达的距离。

Cressman 权重函数

$$W = \begin{cases} (R^2 - r^2) / (R^2 + r^2) & r \leq R \\ 0 & r > R \end{cases} \quad (11)$$

其中 R 为影响半径, 本文取 $R = 300$, r 为网格点到雷达的距离。

4.2 拼图方法和结果评估

用广州雷达和梅州雷达资料做了拼图试验, 这两个雷达都是 CINRAD-SA 型雷达, 同步观测时的回波空间位置和强度的一致性都比较好。为了更好地评估每种拼图方法的优缺点, 用来试验的广州雷达反射率因子被人为整体减小了 7 dBZ, 目的是假设雷达之间存在一定的系统观测差。彩图 9 给出了用最近邻居法、最大值法、指数权重法和 Cressman 权重法合成的 2005 年 6 月 20 日 03:04 广州雷达和梅州雷达 4 km 高度的反射率拼图。

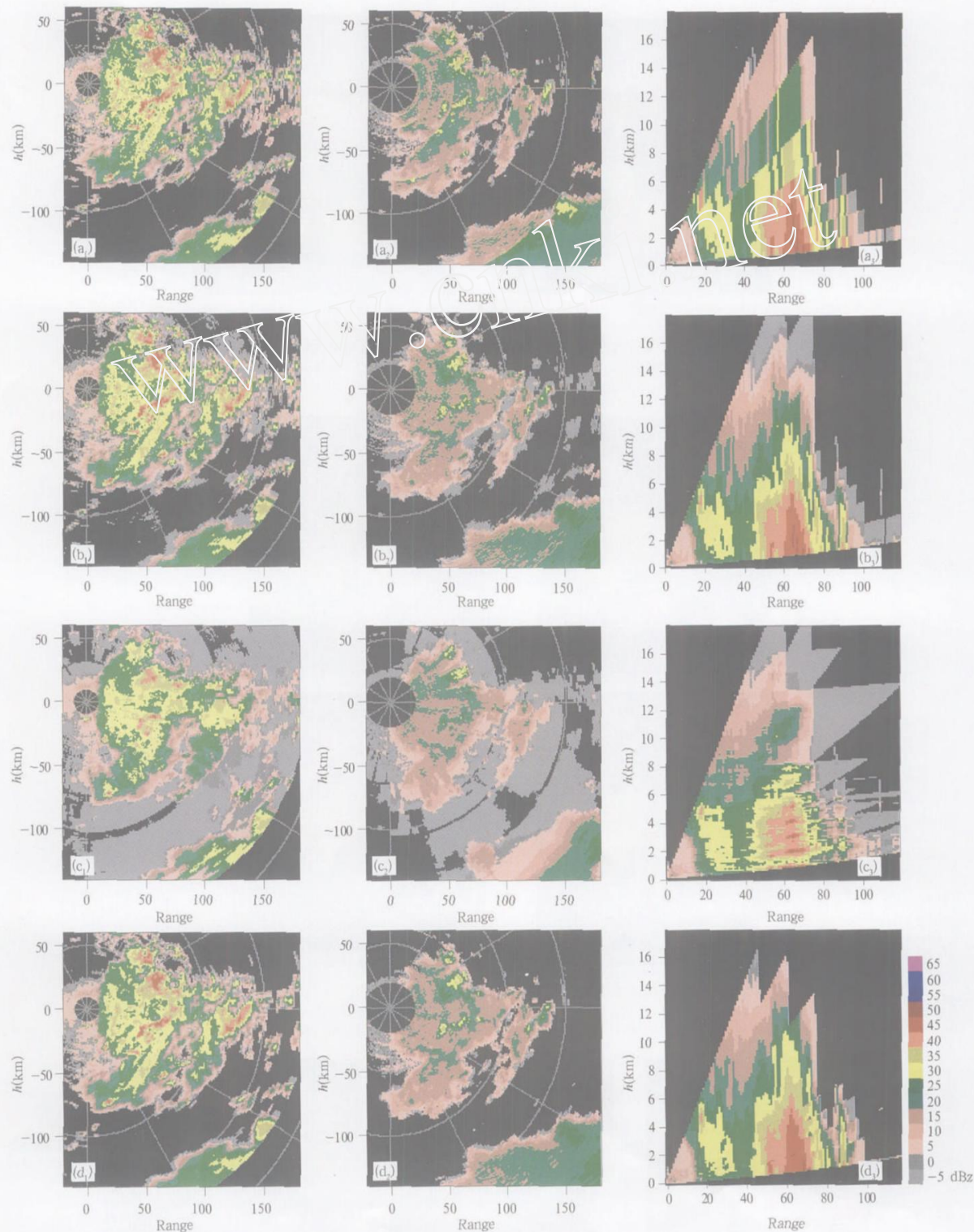


图4 4 km, 8 km高度的反射率水平剖面 and 70°方位的垂直剖面

(a. NN, b. NVI, c. VHI, d. EPI; 1. 4 km CAPPI, 2. 8 km CAPPI, 3. RHI)

Fig.4 Horizontal distributions of reflectivity at 4 km (1) and 8 km (2) CAPPI and the vertical cross section (RHI, 3) of reflectivity at the azimuthal angle of 70° at 0033 UTC 15 June 2005 interpolated by the nearest neighbor method (NN, a), radially/azimuthally nearest neighbor and vertically linear interpolation (NVI, b), vertically/horizontally linear interpolation (VHI, c), and eight point interpolation (EPI, d) from the observations of Guangzhou (GZ) radar (The color code is same as Fig.9)

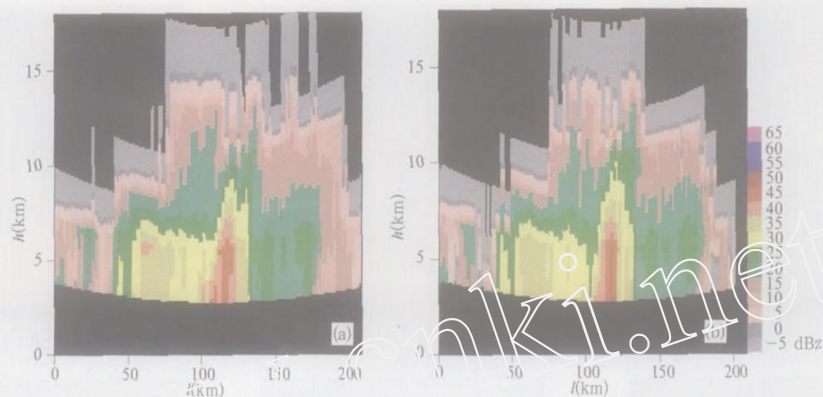


图8 4 km高度等距离线上的反射率差的平均值随时间的演变图
Fig.8 Temporal evolution of the average of reflectivity differences (GZ-MZ) on the equidistant line at 4 km height on 20 June 2005

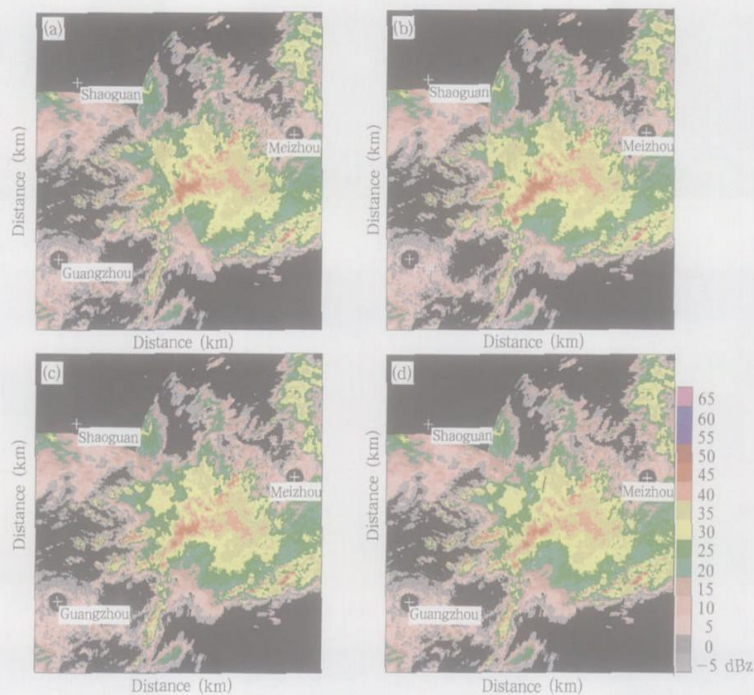


图9 等距离线上的反射率垂直剖面 (a. 来自广州雷达 b. 来自梅州雷达)
Fig.9 Vertical cross sections of synchronously observed reflectivity on the equidistant line at 0304 UTC 20 June 2005 (a. GZ radar; b. MZ radar)

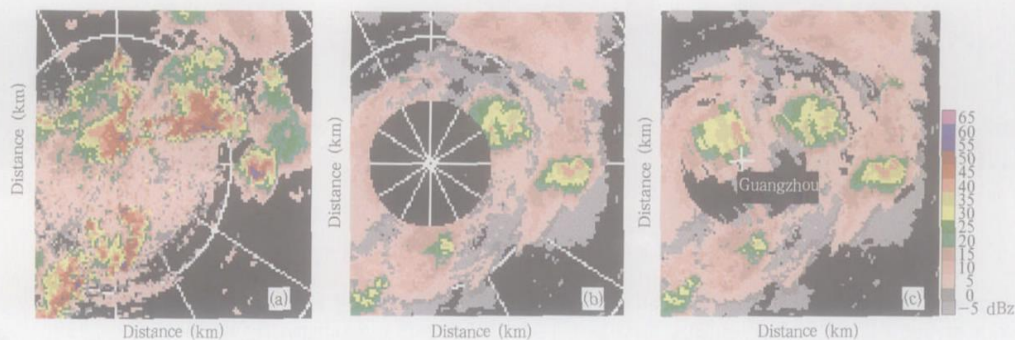


图10 4 km高度的反射率拼图 (a. 最近邻法 b. 最大值法 c. 指数权重平均 d. Cressman权重平均)
Fig.10 The mosaicked reflectivity images at 4 km height at 0304 UTC 20 June 2005. The color code is same as Fig.9 (a. Nearest-neighbor method; b. maximum value method; c. exponential-weighted mean; d. Cressman-weighted mean)

在用多个雷达生成拼图的过程中,最近邻居法没有强加任何平滑。如果由于雷达之间的标定差等原因引起雷达观测值之间存在较大差异,那么,在合成的拼图中,多个雷达的等距离线上就会出现不连续现象(图 9a),这种不连续现象使得最近邻居法不是最理想的多雷达反射率拼图方法,但它是用来检查多雷达标定差异的一种好方法。

最大值法也不涉及到平滑,在资料场中它保留了最大的反射率值。由于插入了一些强回波区域,这种方法可能会减轻由衰减引起的损失。因此,这种方法最适合用于导出产品拼图,例如组合反射率场。但是,这种方法会因为雷达的标定偏差而给出有偏差的估计,从而给出更高的反射率值。如图 9b 所示,两个雷达的重叠区全部保留了梅州雷达的高反射率值,而且在梅州雷达的最大覆盖距离圈上出现了弧形不连续线。

由于波束的展宽,雷达抽样体积与距离成平方增加,结果,反射率场在离雷达远的距离比离雷达近的距离有更少的细尺度结构。因此,在拼图时远距离的观测相比近距离的观测应该给予更小的权重。指数权重函数有一个陡峭的形状,权重随着距离快速减小,它通过允许近距离的观测值做出更多的贡献而保留了反射率结构中的更多细节。Cressman 权重函数的形状相当扁平,来自远距离处的雷达观测值也被给予了相当大的权重,那么远距离处的观测值能抑制与近距离观测值关联的细尺度梯度。从图 9c 和图 9d 中可看出,用指数权重和 Cressman 权重法合成的拼图都没有明显的不连续现象,在靠近各自雷达的区域用指数权重比用 Cressman 权重的合成值要大。

综合以上评估结果,发现指数权重函数的特征对雷达分析特别有用,指数权重函数的形状易于调整以便达到随距离快速下降的效果,但又保证了权重值是一个正值。随距离快速下降的权重对保留原始雷达资料中近距离处的高分辨特征是重要的。对于远距离来说,一个正的权重也是重要的,它确保雷达能影响到它所覆盖的整个区域。其他的权重函数(例如线性或 Cressman)不同时具有这两个重要特征。

雷达做立体扫描时,由于扫描方式的缘故,在最高仰角以上的区域(静锥区)没有观测值,在高仰角区的相邻仰角之间也存在空隙区。把单雷达的体扫资料插值到笛卡尔坐标网格上,在静锥区就没有分析值,在高仰角空隙区的分析值也可能会出现较大

误差。而多个雷达的三维拼图可以减轻由雷达波束几何学引起的各种问题(例如,静锥区、相邻仰角空隙、波束阻挡等)。彩图 10 给出了 2005 年 6 月 20 日 09:32 广州雷达 4.3°仰角的 PPI 和 10 km 高度的 CAPPI 以及广州雷达和梅州雷达 10 km 高度的反射率拼图。从图 10a 中可看出,广州雷达站的西北方约 10 km 处有一块强回波区,由于该强对流在一定高度后就位于雷达静锥区内,所以达到一定高度的 CAPPI 图上就看不到这块回波(图 10b),然而通过梅州雷达和广州雷达资料拼图后,来自梅州雷达的资料填补了这块回波区(图 10c)。另外,在高仰角空隙区,用多个雷达观测值的权重平均肯定比用一个雷达资料得到的分析值更加精确。三维反射率拼图数据形成后有多种用途,例如,它可以用于风暴尺度数值预报模式的资料同化、区域强天气算法、区域降水估算以及水文和航空领域等。

5 结 论

本文利用广州和梅州的新一代天气雷达原始资料,研究了把雷达球坐标反射率资料插值到笛卡尔坐标系下的经纬度网格上的 4 种内插方法和 4 种多雷达资料合成的拼图方法,分析了多雷达同步观测的反射率差异,结果发现:

(1) NVI 方法适用于分析大多数雷达反射率资料,它既能得到空间比较连续的反射率分析场,同时也较好地保留了体扫资料中原有的反射率结构特征,插值前后降水强度变化也较小;

(2) 通过分析广州雷达和梅州雷达同步观测时的等距离线上的反射率因子及反射率因子差,发现两雷达同步观测的空间一致性比较好,系统观测差具有时间稳定性;

(3) 指数衰减函数的权重随着距离快速减少,但又始终是一个正值,这两种特征对多雷达资料合成拼图分析特别有用,它既保留了原始雷达资料中近距离处的高分辨特征,同时确保了雷达能影响到它所覆盖的整个区域。距离指数权重平均法能提供空间连续的三维反射率拼图数据;

(4) 三维反射率拼图减轻了由雷达波束几何学引起的各种问题。

另外,本文只使用两部雷达进行了雷达资料插值和三维拼图试验,这些方法同样可以应用到区域多部雷达甚至全国雷达的资料插值和高精度的三维

拼图中,为新一代天气雷达资料的深度应用,如雷达资料网的同化、在水文和航空中的应用等提供了统一笛卡尔坐标下的高时、空分辨率的三维网格点数据。

参考文献

- [1] Serafin R J, Wilson J W. Operational weather radar in the United States: Progress and opportunity. *Bull Amer Meteor Soc*, 2000, 81:501-518
- [2] 郑媛媛, 俞小鼎, 方翀等. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析. *气象学报*, 2004, 62 (3): 317-328
Zheng Yuanyuan, Yu Xiaodong, Fang Yu, et al. Analysis of a strong classic supercell storm with Doppler weather radar data. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2004, 62 (3): 317-328
- [3] 孙建华, 张小玲, 齐琳琳等. 2002 年 6 月 20~24 日梅雨锋中尺度对流系统发生发展分析. *气象学报*, 2004, 62 (4): 423-438
Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Qi Linlin, et al. An analysis on MCSs in meiyu front during 20—24 June 2002. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2004, 62 (4): 423-438
- [4] Drogemeier K K. Toward a science of storm-scale prediction. Preprints, 16th Conf on Severe Local Storms, Kananaskis Park, Alberta, Canada, Amer Meteor Soc, 1990. 256-262
- [5] 万玉发, 陈少平, 罗建国. 数字化天气雷达联网拼图与卫星云图综合实时处理系统. *气象*, 1994, 20(8): 26-31
Wan Yufa, Chen Shaopin, Luo Jianguo. The interactive processing system integrated weather radar composite satellite images in real time. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 1994, 20(8): 26-31
- [6] Zhang J, Howard K, Gourley J J. Constructing three-dimensional multiple-radar reflectivity mosaics: Examples of convective storms and stratiform rain echoes. *J Atmos Oceanic Tech*, 2005, 22:30-42
- [7] Carrie L, Zhang J, Howard K. Four-dimensional dynamic radar mosaic. The 11th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Hyannis, MA, Amer Meteor Soc, CD-ROM, 2004
- [8] Jorgensen D P, Hildebrand P H, Frush C L. Feasibility test of an airborne pulse-Doppler meteorological radar. *J Appl Meteor*, 1983, 22:744-757
- [9] Fulton R. WSR-88D polar to HRAP mapping. Tech Memo, Hydrology Research Laboratory, Office of Hydrology, National Weather Service, Silver Spring, MD, 1998. 33pp
- [10] Mohr C G, Vaughn R L. An economical procedure for Cartesian interpolation and display of reflectivity factor data in three-dimensional space. *J Appl Meteor*, 1979, 18: 661-670
- [11] Miller L J, Mohr C G, Weinheimer A J. The simple rectification to Cartesian space of folded radial velocities from Doppler radar sampling. *J Atmos Oceanic Tech*, 1986, 3:162-174
- [12] Weygandt S S, Shapiro A, Drogemeier K K. Retrieval of model initial fields from single-Doppler observations of a supercell thunderstorm. Part I: Single-Doppler velocity retrieval. *Mon Wea Rev*, 2002, 130:433-453
- [13] Shapiro A, Robinson P, Wurman J, et al. Single-Doppler velocity retrieval with rapid-scan radar data. *J Atmos Oceanic Tech*, 2003, 20:1758-1775
- [14] Askelson M A, Aubagnac J-P, Straka J M. An adaptation of the Barnes filter applied to the objective analysis of radar data. *Mon Wea Rev*, 2000, 128:3050-3082
- [15] Trapp R J, Doswell C A. Radar data objective analysis. *J Atmos Oceanic Tech*, 2000, 17:105-120
- [16] Heymsfield G M. Statistical objective analysis of dual-Doppler radar data from a tornadic storm. *J Appl Meteor*, 1976, 15: 59-68
- [17] Gao J, Xue M, Shapiro A, et al. A variational method for the analysis of three-dimensional wind fields from two Doppler radars. *Mon Wea Rev*, 1999, 127:2128-2142
- [18] Doviak R J, Zrnic D S. *Doppler Radar and Weather Observations*. 2d ed. Academic Press, 1993. 562pp
- [19] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. *雷达气象学*, 北京: 气象出版社, 2001. 72-76
Zhang Peichang, Du Bingyu, Dai Tiepi. *Radar Meteorology*. Beijing: China Meteorological Press, 2001. 72-76

STUDY OF METHODS FOR INTERPOLATING DATA FROM WEATHER RADAR NETWORK TO 3-D GRID AND MOSAICS

Xiao Yanjiao^{1,2,3} Liu Liping¹

1 *Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044*

2 *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

3 *Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074*

Abstract

The advent of Internet-2 and effective data compression techniques facilitates the economic transmission of base-level radar data from the Doppler radar network to users in real time. The native radar spherical coordinate system and large volume of data make the radar data processing a nontrivial task, especially when data from several radars are required to produce composite radar products. This paper investigates several approaches to remapping and combining multiple-radar reflectivity fields onto a unified 3D Cartesian grid with high spatial and temporal resolutions. The purpose of the study is to find an analysis approach that retains physical characteristics of the raw reflectivity data with minimum smoothing or introduction of analysis artifacts. Moreover, the approach needs to be highly efficient computationally for potential operational applications. Four interpolation schemes were tested for remapping radar data from polar coordinates onto 3 dimension Cartesian coordinates here. The first scheme, nearest neighbor mapping (NN), is where each grid cell gets a value from the nearest data bin (based on the distance between center of the grid cell to the center of the radar data bin). The second scheme is a nearest neighbor scheme on range-azimuth planes combined with a linear interpolation in vertical direction (NVI). The third scheme uses a linear interpolation in vertical direction plus a horizontal interpolation (VHI). The fourth scheme is dual linear interpolation using data from eight points around grid cell (EPI). Through comparison of vertical and horizontal reflectivity cross section and estimated one-hour precipitation obtained by use of the four interpolation schemes, it was found that the vertical interpolation scheme with nearest neighbor on the range-azimuth plane is the most reasonable analysis scheme that provides consecutive reflectivity fields and retains high-resolution structure comparable to the raw data. In order to check spatial coherence and calibration differences of two radars when they detect synchronously atmosphere, horizontal and vertical structure of reflectivity fields on equidistant line are analyzed. Result shows the space consistency of synchronous observation of Guangzhou and Meizhou radar is better. After reflectivity fields from individual radars are remapped onto the Cartesian grid, they are combined to produce a unified 3D reflectivity grid. There are many regions, especially at upper levels of the atmosphere, are covered by multiple radar umbrellas. For grid cells with multiple radar coverage, the following three mosaic schemes are tested. The first scheme is the nearest neighbor scheme where the analysis value from a radar that is closest to the grid cell is assigned. The second scheme is to take the maximum among the analysis values from multiple radars. The third scheme is a weighted mean scheme. Two weighting functions, both based on distances between a given grid cell and the multiple radars covering the grid cell, are tested. The first is a Cressman scheme with 300 km radius of influence and the second is an exponential function with 100 km distance scale. Result shows the distance-exponential-weighted mean scheme provides a spatially consistent reflectivity mosaics while retaining the magnitude of the observations from the close radar. Mosaics can mitigate various problems that caused by the geometry of radar beam such as data voids with the cone of silence above the radar and in regions below the lowest beam.

Key words: Radar network, Reflectivity, 3D mosaics, Interpolation method, Distance-exponential-weighted mean.