

文章编号: 1004-4965 (2008) 02-0105-06

登陆台风的多普勒雷达资料质量控制和水平风场反演

刘淑媛¹, 闫丽凤², 孙健³

(1. 空军气象中心, 北京 100843; 2. 烟台市气象局, 山东 烟台 264003;
3. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 消除噪音和速度模糊、进行水平风场的反演并检验是正确使用和充分利用多普勒雷达探测资料的前提。对 2005 年 8 月山东烟台多普勒雷达探测到的 0509 号台风“麦莎”的存在速度模糊的径向速度资料首先进行噪音和速度模糊消除处理, 检验结果表明对资料的退模糊处理是成功的; 其次进行了水平风场的反演, 并对反演的风场从雷达径向速度的特征、大尺度环境风场特征、与卫星云图云带的对比和以台风中心为圆心计算的径向风垂直剖面特征等方面进行检验。结果表明, 利用单多普勒雷达探测资料得到的水平风场能够清晰地给出登陆热带气旋内部存在的中小尺度系统, 及其水平和垂直结构, 并表明与台风外围雨带强降水区域相对应的是明显的中尺度水平风场的切变与辐合区。反演风场也可以为进一步利用单多普勒雷达探测资料分析和研究登陆台风内部的中尺度结构提供高分辨率的可靠的分析资料。同时证明, 使用的退速度模糊方法能够有效地应用于较完整资料的速度模糊的自动消除, 以及 VAP 方法对于中小尺度风场分析的实用性。

关 键 词: 多普勒雷达; 水平风场; 反演; 速度模糊; 登陆台风

中图分类号: P412.25 文献标识码: A

1 引 言

台风是热带海洋上生成的一种具有暖心结构的强烈的气旋性涡旋。登陆台风由于积聚很强的能量并携带大量的水汽, 时常给所经过的地区造成人员伤亡和重大经济损失。如 2005 年登陆的台风“桑美”就造成 200 多人死亡以及巨大的经济损失。因此, 可以造成强灾害的台风在登陆后的路径、强度、维持机制和相应的天气变化就成为夏季天气预报和天气研究中的重点问题。目前对登陆后台风的大尺度的数值模拟分析和利用常规观测资料和卫星云图进行的观测分析已经得到一些令人鼓舞的研究成果^[1-4]。相比之下, 对台风内部的中小尺度的结构分析与研究还较薄弱。由于所拥有的观测资料分辨率的限制, 对登陆后热带气旋内部中尺度观测资料分析研究很少, 相关的数值模拟研究由于缺少实际资料的验证也因此受到限制。对台风内部中尺度的对流单体的风场结构的观测分析的缺乏, 限制了对台风详细结构的认识, 也限制了对其机理的研究和形成灾害性天气及路径的预

报。而具有高分辨率的多普勒雷达和卫星观测资料的成功应用成为解决问题的关键。

多普勒雷达应用于气象探测以来, 为很多系统的中小尺度的分析和预报提供了高时空分辨率资料^[5-6]。随着雷达硬件技术的日益改进, 探测普通天气系统时已经很少出现速度模糊了。但是在探测非常强烈的天气系统时, 速度模糊还是不可避免。因此, 使用前必须首先进行资料的模糊和噪音消除的处理。而且由于雷达直接探测得到的是径向速度, 在进行分析时有一定的局限性, 如果进行水平风场的反演则可以更好地为气象科学研究和预报服务。因此, 在使用前, 对多普勒雷达探测的速度资料进行噪音和速度模糊消除以及水平风场的反演是非常重要的步骤, 同时, 由于目前的每种单多普勒雷达水平风场反演方法都存在不同程度的假定^[7-12], 为此在得出反演结论后需要进行一系列的检验, 以证明反演结果的可靠性。这些是多普勒雷达探测资料正确使用和充分利用的前提。

本文对 2005 年 8 月 6 日 03 时(北京时, 以下同)

收稿日期: 2006-08-20; 修订日期: 2006-10-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40405002)资助

作者简介: 刘淑媛, 女, 天津人, 高工, 博士, 研究方向: 雷达气象和中尺度气象。E-mail: lsy.shuyuan@gmail.com

的 0509 号台风“麦莎”的单多普勒雷达速度观测资料进行噪音和速度模糊消除, 并进行水平风场的反演, 然后对反演风场的正确性进行了多方面的检验, 以便为以后利用单多普勒雷达探测资料进行登陆热带气旋的分析提供可靠的资料。

2 天气过程及大尺度环境场概况

2005 年 8 月 1 日 08 时, 强热带风暴“麦莎”发展为台风, 并不断加强。在 8 月 6 日 03 时 40 分在浙江第一次登陆, 随后继续向西北方向行进(图 1)。对山东的影响从 7 日 07 时开始到 9 日凌晨结束。期间, 山东全省平均降水量 42.9 mm, 烟台降水量最大, 达到 164.9 mm。降水主要集中在 7 日 20 时~8 日 06 时。在这段时间内, 烟台一直位于“麦莎”中心的东北部地区。高空 500 hPa 环流形势(图 2)表明“麦莎”一直沿副高外围偏南气流移动, 空中西风气流一直较弱。烟台位于气旋东北部东南偏南气流向东北气流转向的区域。

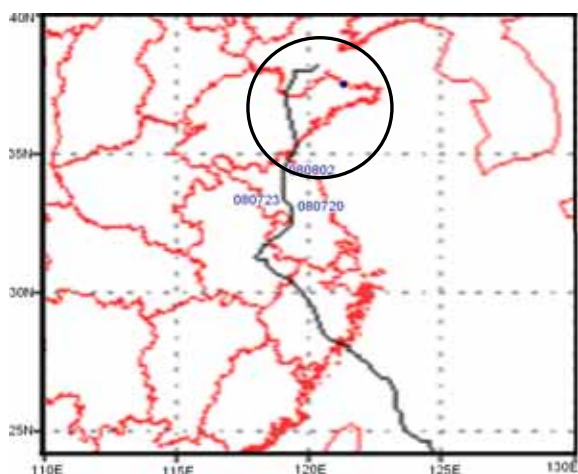


图 1 台风“麦莎”路径图和烟台雷达探测范围

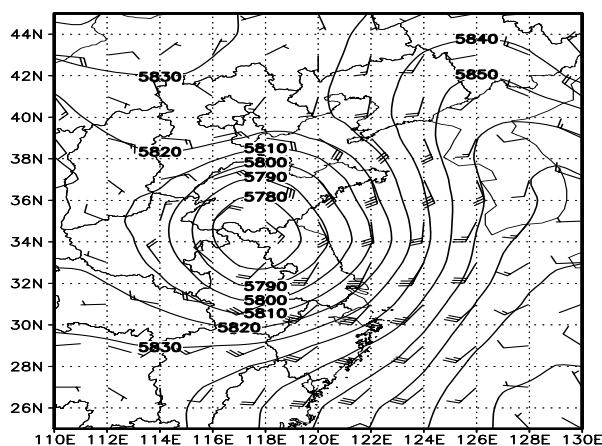


图 2 8 月 8 日 02 时 500 hPa 风场与位势场

3 雷达资料的噪音和模糊处理

烟台雷达位于 37.5°N , 121.38°E , 海拔高度 0.41 km。所探测的资料为每 6 分钟一次的立体扫描, 每次体扫含 9 个仰角。方位角分辨率为 1° ; 速度径向分辨率为 0.25 km, 探测半径为 115 km; 强度径向分辨率为 1.0 km, 探测半径 230 km (图 1)。径向风风向趋近雷达为负, 远离雷达为正, 最大不模糊速度 27 m/s。几乎每个时次的径向速度资料都存在速度模糊。因此, 下面首先对径向速度进行消除噪音和退速度模糊的处理。

根据 Bergen 等^[13]的实验结果, 选用一个 3×3 窗口滤去较大的噪音。为了消除孤立的有值点, 在一个有效值点的周围 8 个邻近点中, 有多于 K 个点没有有效值时, 将此点置为缺测点。为了消除孤立的缺测点, 在一个缺测点周围 8 个点中有多于 K 个点为有效值, 将中心点同一距离圈的前一个点赋值给中心点进行这样的预处理后, 采用刘淑媛 (2004 年)^[11]提出的速度模糊消除方法进行处理。该方法步骤如下。

第 1 步: 恢复速度-方位廓线的连续性。从雷达扫描的任意一个距离圈开始 (为方便起见可以从第一个距离圈开始), 找出第一个不为零的点为起点, 以此点为中心选取一个 $n \times m$ 的小窗口 (如 3×3), 在窗口中逐点与中心点比较, 如果与中心点符号相反, 且两点差的绝对值大于给定的判断标准 LIMIT (其数值原则上应大于不模糊速度), 则认为该点是模糊点, 并做退模糊处理。然后再对下一点进行同样的处理, 但前面已做模糊纠正的点只参与判断而不做处理, 以确保每一个点只做一次纠正。将此步骤遍历整个廓线, 并类推直到遍历整个雷达扫描区域。

第 2 步: 判断廓线是否发生了整体偏移。根据在没有模糊情况下的速度-方位廓线上总有一个最大值和最小值, 而且它们的符号相反、数值大致相当做出判断。在每一距离圈中选出该圈的最大值 ($V_{r\max}$) 和最小值 ($V_{r\min}$) 并计算出两者的差与最大不模糊速度的比值 n , 即 $n = \text{int}((-V_{r\min} + V_{r\max})/V_{\max})$ 其中, int 为取整函数。若 $n=0$, 则第一步得到的连续廓线没有发生整体偏移, 表明该廓线的速度模糊已消除。若 n 的绝对值 ≥ 1 , 则第一步得到的连续廓线存在整体偏移。其整体偏移的数值就是 $n \times V_{\max}$, 将廓线上每一点按 $V_r^* = V_r - nV_{\max}$ 进行修正, 就可使廓线调整到正确位置。

第 3 步: 根据风场的连续性沿径向对边缘区域进行调整。图 3 (见 108 页) 给出了 2005 年 8 月 8 日 03 时 02 分观测的 0.62° 仰角原始径向速度 (图 3a)

和模糊消除后的径向速度(图 3b)以及第 180 个距离库圈的噪音和模糊消除前后的速度方位廓线(图 3c、3d; 纵坐标为速度, 单位 m/s; 横坐标为角度, $0 \sim 360^\circ$)。从图 3a 可见, 在雷达的东南侧 $110 \sim 150^\circ$ (正北为零度, 下同) 之间存在大片的模糊区, 在雷达的西侧 $250 \sim 270^\circ$ 距离雷达约 40 km 处之间存在一小片的模糊区。而在图 3b 这两片模糊区被消除了。

在图 3c、3a 相同仰角与第 180 距离库圈原始径向速度方位廓线存在两处巨大的跳跃。首先径向速度从 -27 m/s 突然跳跃到正值 27 m/s, 然后又跳回到 -27 m/s; 后面还存在一处比较窄的跳跃, 是径向速度从 27 m/s 突然跳跃到 -27 m/s。这两处就是速度模糊所在的区域, 与图 3a 中的大片和小片的模糊区相对应。而在图 3d, 经过噪音和模糊消除后第 180 距离库圈方位速度廓线上突然的跳跃没有了, 整条曲线近似为一条余弦曲线, 而且曲线中的较大的噪音也被消除, 曲线变得略光滑, 但原有的主要的脉动依然保留。

从上面的分析可以看到, 所需要使用的径向速度资料经过处理后, 已经消除了会影响进一步分析的速度模糊和大的噪音, 并保留了有用的中尺度的风场信息。

4 风场的反演及检验

4.1 反演风场方法简介

使用陶祖钰 (1994 年) 提出的 VAP (Velocity Azimuth Processing) 方法反演水平风场, 刘淑媛等^[14] 对该方法进行系统的误差分析和检验表明, 该方法可用于分析 β 中尺度系统的风场结构。

该方法假定反演廓线上的相邻 $2\Delta\theta$ 的方位角速度相等, 径向风 v_r , α 为径向速度与风矢量的夹角, θ 为方位角, $\Delta\theta$ 为所取的两个方位角之差。则水平风速为

$$v = \left| \frac{v_{r1} - v_{r2}}{2 \sin \alpha \sin \Delta \theta} \right|$$

水平风向为

$$\text{tg} = -\frac{v_{r1} - v_{r2}}{v_{r1} + v_{r2}} \text{ctg} \Delta \theta$$

本个例中 VAP 方法反演风场的水平网格距 1.15 km, 在绘制风场过程中, 为了避免风羽间的重叠, 采用间隔 6 或 8 个点抽点显示。

4.2 正确性检验

为检验反演的水平风场是否可以应用到登陆台风的中尺度结构的分析中, 本文通过以下几方面对反

演的水平风场的正确性和可用性进行检验。

(1) 雷达径向速度的特征分析。

图 4 (见 108 页) 是 8 月 8 日 0 时 05 分反演的水平风场和相应的径向速度。可以看到, 反演风场在径向速度零线附近 (正负交界处) 风向与向径是基本垂直的 (图中绿色箭头所示); 在径向速度的大值区, 风向与向径基本平行 (图中红色箭头所示); 在正径向速度区, 风向是朝向雷达的; 在负径向速度区, 风向是远离雷达的。反演的水平风场这些特征与根据径向速度的分析的水平风场应有特性相符合。因此, 从径向速度的特性分析来看, 反演的水平风场是正确的。而反射率与反演的水平风场叠加分析显示, 在雷达东南的强回波 1 对应风场的风速辐合与气旋性风切变; 强回波 2 对应风场的风速辐合; 强回波 3 对应风场的风向辐合。因此, 从中尺度降水分布看, 反演的水平风场是合理的。

(2) 大尺度环境风场对比分析。

在 8 月 8 日 0 时前后, 台风中心 (119.5°E , 35.5°N) 位于雷达西南部, 环境风场 (图 2) 的走向以东南风向东风和东北风转折。而反演风场 (图 4a) 显示, 在雷达的东部为东南偏南风逐渐转为东南风, 从雷达中心开始接近气旋中心一侧开始出现东风, 然后逐渐转为东北风, 显示的风场的气旋中心在雷达的西南部。可以看到, 反演风场与实际环境风场的主体走向相吻合, 反演风场是合理的。

(3) 平均风垂直剖面分析。

为了进一步检验反演风场的正确性, 以距地面高度为垂直坐标, 每 0.5 km 一层; 以气旋中心与雷达所在位置连线为 x 轴, 制作反演风场的径向风分量的垂直剖面 (图 5, 见 108 页)。 x 轴方向由左向右表示距离气旋中心由近到远。图 5 中黑色实线标出入流气流的高度。如 7 日 22 时 03 分, 最左端为距气旋中心 397 km, 最右端为距气旋中心 627 km, 即 x 轴长度为雷达速度探测范围的直径。7 日 22 时气旋中心大约位于 119.2°E , 33.2°N , 与雷达中心连线相对正北约 21.5° 的夹角, 距离雷达中心为 512 km。

从图 5 可以看到, 在 2.5 km 以下基本为偏东气流, 相对气旋中心是入流; 3~4 km 气流方向开始出现偏转; 4 km 以上气流相对气旋中心转变为出流。图 5 中接近气旋中心的位置, 由于接近眼区, 在 2 km 以上全部为出流, 这是与眼区的下沉气流相吻合的。这些特征与我们已知的大尺度的台风垂直气流的流入流出分布是一致的。可见, 从径向风分量的垂直分

布看反演风场是合理的。

(4) 与卫星云图云带和回波雨带的对比分析。

雷达相对于卫星云图的探测范围很小,与云图(图 6a)对比,只能分析粗略的特征。图 6a 中红色

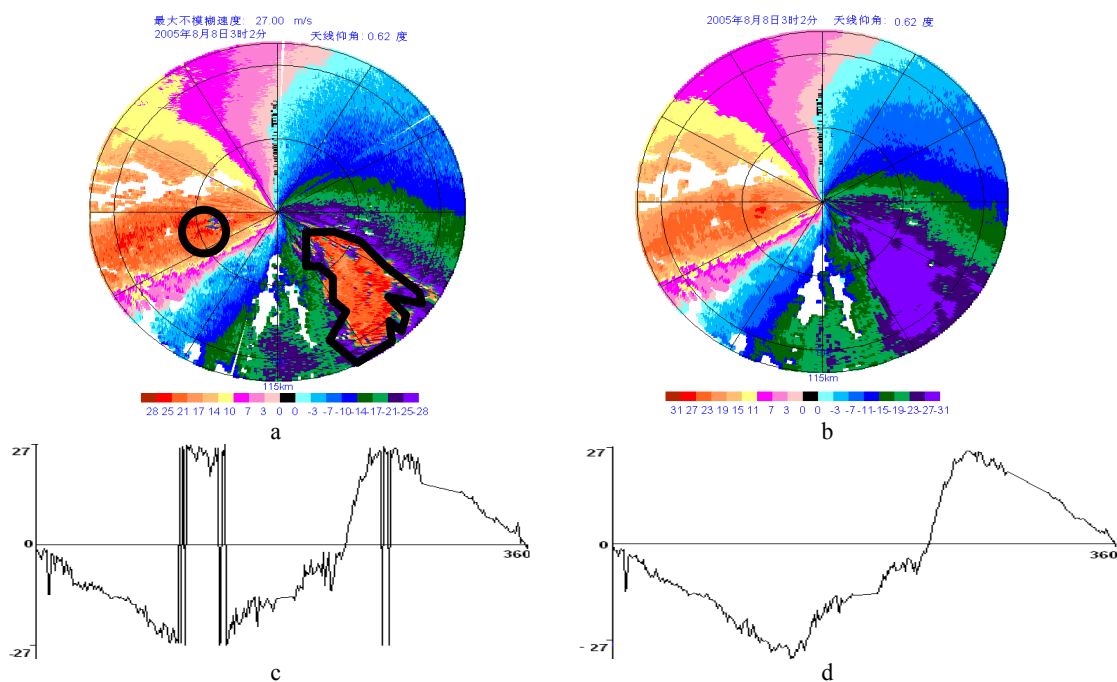


图 3 原始径向速度 (a)、模糊消除后的径向速度 (b)、原始第 180 个距离圈的径向速度廓线 (c)、退模糊后的第 180 个距离圈的径向速度廓线 (d) c、d 的纵坐标为速度,单位 m/s;横坐标为角度,0~360°。

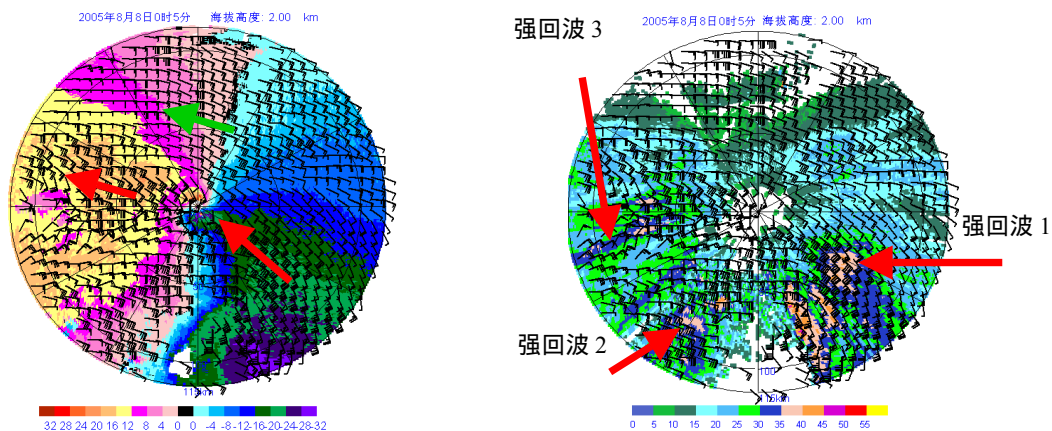


图 4 雷达探测的径向速度与反演风场 (a) 和反射率与反演风场 (b)

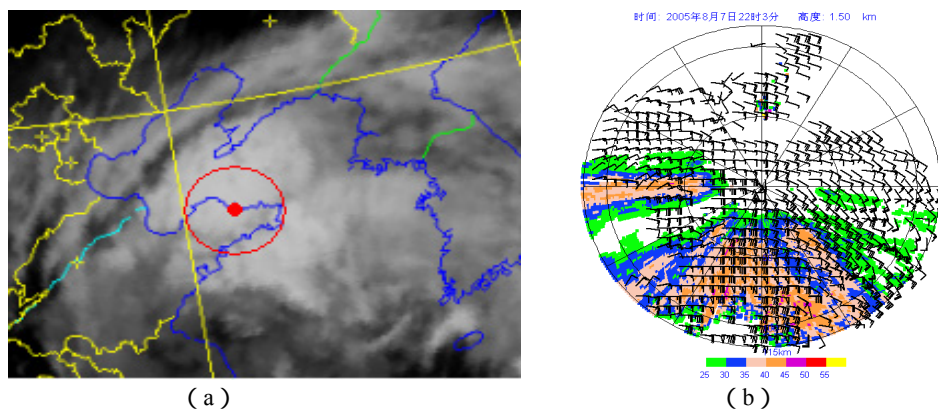


图 6 8 月 7 日 22 时 02 分的卫星云图 (a) 和 03 分 1.5 km 高度的雷达回波及反演风场图 (b)

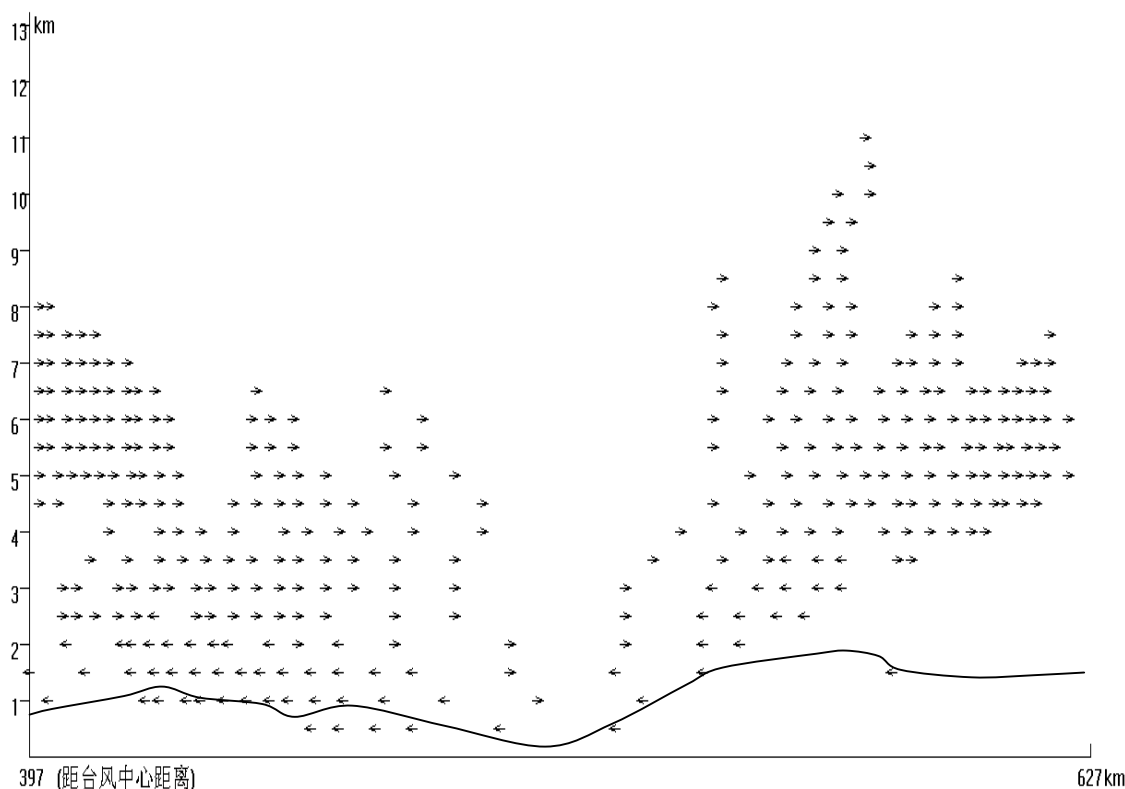


图5 以台风中心为圆点制作的反演风场径向风分量的垂直剖面(7日22时03分)

的圆点为雷达所在位置,圆圈为雷达的风场探测范围(半径约115 km)。8月7日22时雷达所探测的范围位于气旋中心东北部螺旋云带内,这一区域存在较强的对流。云图显示在雷达东部约70 km处有一片对流较弱的区域,图6b中雷达探测的回波同样较弱,而反演的风场显示这里低层为风场的辐散区,这与降水较弱相对应。

对应雷达南部的回波显示的螺旋雨带,反演的风场是一片强风速区并且存在很强的风切变。在雷达西部的带状强回波区,反演的风场对应一条东北风与东风之间的辐合带。这些辐合辐散区与雨带或云带的对应关系,是符合天气学原理的。也从另一个角度说明,反演的风场不仅与大尺度环境风场和所了解的热带气旋的垂直与水平风场的大尺度结构相吻合,在中尺度结构方面与云图和降水回波对应分析也是合理的。因此可以利用反演的风场为登陆的热带气旋的中尺度分析提供有力的观测资料分析依据。

5 结 论

(1) 在不影响中尺度信息分析的前提下,对径

向速度进行噪音过滤,消除噪音;然后对存在速度模糊的径向速度进行速度模糊消除,经过处理后的径向速度模糊基本消除,通过这个例检验进一步表明,刘淑媛(2004年)提出的速度模糊消除方法应用于较完整资料的速度模糊自动消除是有效的。

(2) VAP方法进行水平风场反演并对反演的风场从雷达径向速度的特征、大尺度环境风场特征、与卫星云图云带和雷达探测的回波强度的分布的对比和径向风垂直剖面等方面进行检验,表明反演风场可用于登陆热带气旋的中尺度结构的分析。

(3) 中小尺度的强回波明显对应中小尺度的风场的辐合与辐散与气旋性风切变。反演的风场清晰地给出了登陆热带气旋内部水平风场中存在的中尺度系统的水平和垂直结构的分布,可以为进一步利用单多普勒雷达探测资料分析和研究登陆台风内部的中尺度结构提供高分辨率观测资料。

下一步将利用上述结果并结合数值模拟进行台风外围螺旋雨带中小尺度结构的详细分析。

参 考 文 献：

- [1] 王达文. 北上热带气旋分析与预报[M]. 北京：气象出版社，2001：249
- [2] 陈联寿，董克勤，金汉良，等译. 热带气旋全球观[M]. 北京：气象出版社，1994：341
- [3] 蒋尚城，张谭，周鸣盛，等. 登陆北上台风所导致的暴雨—半热带系统暴雨[J]. 气象学报，1981，39（1）：18-27.
- [4] 陈联寿，徐祥德，罗哲贤，等. 热带气旋动力学引论[M]. 北京：气象出版社，2002：317.
- [5] 王峰云，王燕雄，陶祖钊. 单多普勒天气雷达的中尺度风场探测技术研究[J]. 热带气象学报，2003，19(3)：291-298.
- [6] 刘黎平，曹俊武，莫月琴，等. 雷达遥感新技术及其在灾害性天气探测中的应用[J]. 热带气象学报，2006，22（1）：1-9.
- [7] SUN Juan-zhen, FLICKER D W, LILLY D K. Recovery of Three-Dimensional wind and temperature fields from simulated Single Doppler Radar Data[J]. J Atmos Sci, 1991, 48(6): 876-890.
- [8] QIU Chong-jian, XU Qin. A Simple adjoint-method of wind analysis for Single Doppler Data[J]. J Atmos Oceanic Tech, 1992, 9(5): 588-598.
- [9] ALAN Shapiro, PAUL Robinson. Single-Doppler velocity retrieval experiments with a Simple 4DVAR technique[C]//29th International Conference on Radar Meteorology[C]. Montreal: American Meteor Soc, 1999: 26-29.
- [10] 姜海燕，葛润生. 一种新的单部多普勒雷达反演技术[D]. 北京：中国气象科学研究院硕士研究生毕业论文，1995.
- [11] 刘淑媛，王洪庆，陶祖钊. 一种简易的多普勒雷达速度模糊纠正技术[J]. 应用气象学报，2004，15(1): 111-116.
- [12] 陶祖钊. 从单 Doppler 速度场反演风矢量场的 VAP 方法[J]. 气象学报，1992，50(1): 81-90.
- [13] BERGEN W R, ALBERS S D. Two and three-dimensional dealiasing of Doppler radar velocity[J]. J Atmos Phys, 1988, 5: 305-319.
- [14] 刘淑媛，刘黎平，郑永光，等. 单多普勒雷达 VAP 方法反演水平风场的检验[J]. 北京大学学报，2005，41（2）：163-171.
- [15] 朱乾根，林锦瑞，寿绍文，等. 天气学原理与方法[M]. 北京：气象出版社，2000：511.

RETRIEVAL OF HORIZONTAL WIND AND QUALITY CONTROLLING OF SINGLE DOPPLER RADAR DATA ON LANDING TYPHOON

LIU Shu-yuan¹, YAN Li-feng², SUN Jian³

(1. Air Force Meteorological Center, Beijing 100843, China; 2. Yantai Weather Bureau, Yantai 264003, China;
3. Chinese Academy of Meteorological Sciences/State key Laboratory of Severe Weather, Beijing 100081, China)

Abstract : The preconditions to make best use of the Doppler radar data includes the noise removing, velocity ambiguity distinguishing, horizontal wind field retrieving and exactness verifying. The noise removing and velocity ambiguity distinguishing was made in this work for the Doppler radar data collected during August 2005 on landing typhoon Matasa (0509) in Yantai city, Shangdong Province, and the verified result showed that the quality control for this dataset was correct. After the horizontal wind field was retrieved, the synoptic analysis were done, including the characteristics of the radar radial velocity, the characteristics of the large-scale wind field, compartment with the satellite images and the vertical cross of the velocity. The analysis results show that the meso/small-scales systems in the landing typhoon and its horizontal/vertical structure could be clearly retrieved using the dataset collected by single Doppler radar, and a shear or a convergence was corresponding with the sever storm band around the tropical cyclone. At the same time, the retrieved wind field from single Doppler radar was proved to be a reliable and high-resolution dataset to analysis the inner meso-scale structure of the landing typhoon. It was also proved that the method for removing the velocity alias could be an effective approach to the preliminary quality control of the Doppler radar data, and the VAP method could also be a reasonable solution for analysis of meso-scale wind field.

Key words: Doppler radar ; horizontal wind ; retrieval ; velocity alias ; landing typhoon