

C 波段双多基地多普勒雷达资料处理和三维 变分风场反演方法研究

刘黎平¹ 莫月琴¹ 沙雪松² 苏 涛²

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 安徽四创电子股份有限公司, 合肥 230088

摘 要 研究了双多基地多普勒雷达资料的配对方法、风场反演的区域和精度, 并研制了基于三维变分方法的双多基地多普勒雷达系统的风场反演系统。利用安徽四创电子股份有限公司研制的一个主动雷达和两个侧向接收天线组成的双多基地多普勒雷达系统获取的外场试验资料, 进行了风场反演试验。该风场反演方法利用主动雷达和被动接收系统测量的径向速度作为弱约束, 用质量连续方程作为强约束, 来反演三维速度场。利用 Advanced Regional Prediction System (ARPS) 模式模拟的一次龙卷过程的结果, 进行了风场反演的模拟试验。结果表明: 双多基地多普勒雷达系统能较准确再现龙卷的中尺度特征和强上升气流的构造, 从上下两个方向进行垂直积分可以减小垂直速度的反演误差, 利用两个侧向接收系统的资料能进一步减小径向速度随机误差对风场反演的影响, 增大风场反演的范围。三个分系统单独获取的资料空间配对效果很好, 利用不同雷达径向速度反演的风场比较近似, 反演的风场与径向速度定性分析和速度方位显示方法(VAD)结果比较一致, 该双多基地多普勒雷达系统同步观测技术设计合理, 在实时探测三维风场特别是探测近地层风场方面有广泛的应用潜力。

关键词 双多基地多普勒雷达 资料处理 风场反演

文章编号 1006-9895(2005)06-0986-11

中图分类号 P412

文献标识码 A

Radar Data Processing and a Variational Algorithm for 3-Dimensional Wind Field Retrieval by C Band Bistatic Radar Network

LIU Li-Ping¹, MO Yue-Qin¹, SHA Xue-Song², and SU Tao²

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

2 Anhui Sun-Create Electronics Co. Ltd., Hefei 230088

Abstract The data processing and variational algorithm for 3-D wind field retrieval by bistatic Doppler radar network are developed and bias of retrieved wind is analyzed. The wind retrieval algorithm is used to analyze the bistatic radar data in the field experiment conducted in Anhui Province in 2004. The algorithm uses the Doppler velocities of the three receivers as weak constraints and uses the continuity equation as a strong constraint in a cost function in which the two horizontal wind components are the control variables. The ARPS simulation outputs for a tornado process are used to examine the performance of the algorithm. The results show that the bistatic radar system could reproduce the mesoscale features of the tornado, upward and downward integrations can reduce the bias of retrieved vertical velocity. The radial velocity data from second bistatic radar can reduce the retrieval bias and extend the coverage. The radar data recorded by three receivers match very well. The wind fields calculated from different datasets are similar and agree with VAD (the Velocity Azimuth Display) results. The design and concept of the bistatic radar

system are correct, the data can be used in 3-D wind field analysis, especially in the boundary wind retrieval.

Key words bistatic radar, data process, wind retrieval

1 引言

降水系统风场、气压和温度场的三维结构探测对中尺度天气的诊断研究、灾害性天气的监测和预警、临近预报和数值预报模式是非常重要的,特别是近地层风场对降水系统的形成和维持起了非常重要的作用^[1]。目前,多普勒雷达是唯一探测这些要素三维结构的技术。多普勒天气雷达与常规天气雷达相比最大的优势就是可探测降水系统的径向速度,从而获取有关云和降水系统的动力特征,增强对强天气过程的监测和预测能力。我们知道,直接分析径向速度很难得到降水系统完整的动力特征,为此,人们发展了很多单多普勒雷达风场反演方法,如速度体积处理方法(VVP)、VAP方法、涡度-散度方法、三维变分方法、四维变分方法等^[2~7],并进行了大量的试验,在一些个例研究方面取得了一定的成功。但总的来讲,这些方法都是在比较强的假设基础上进行风场反演的,风场反演效果与径向速度的分布类型相关很大。实践证明:为了分析三维风场的空间结构和演变规律,同时获取不同方向的径向速度资料是非常必要的。

在发展单雷达风场反演方法的同时,双多普勒雷达探测方法和技术在大型外场试验和强对流过程风场中尺度三维结构研究方面得到了广泛的应用,极大推进了龙卷、冰雹等降水过程机理研究的水平^[8]。在国家重点基础研究规划项目“我国重大气象灾害的形成机理及预测理论研究”项目中,由我国新一代天气雷达和可移动多普勒雷达组成的双多普勒雷达系统应用于暴雨中尺度风场结构的观测和研究中,第一次得到了我国长江流域梅雨锋暴雨风场的三维中尺度结构,加深了对暴雨形成和演变机理的了解^[9, 10]。但该技术的主要问题是投资大,业务推广比较困难,在探测快速变化的小尺度系统时,由于双多普勒雷达探测同一散射体时间差而造成的径向速度的误差等^[11]。

另一种同时探测多个方向径向速度的技术就是双多基地多普勒雷达,它利用雷达侧向散射信号来估测另外方向的径向速度,从而达到同时探测两个或多个方向径向速度的目的,以提高多普勒雷达探

测三维风场的能力。双多基地多普勒雷达系统由一部主动的常规多普勒雷达(主站)、一部或多部布设在不同位置的被动侧向接收系统(从站)组成^[12],它的主要特点是被动接收系统的价格便宜、没有高压发射部分,容易维护,不同方向的径向速度资料的同步性好。该技术已经在美国、加拿大和日本得到应用^[13],并用于“中国暴雨”研究项目。这一技术的主要问题是:被动接收天线增益低,探测范围比较小,易受主动雷达旁瓣侧向散射回波的影响,部分反演区径向速度的空间分辨率比较低,风场反演精度比双多普勒雷达低^[14~16]。尽管如此,该技术仍然是很有应用价值的三维风场探测技术。

2004年夏季,安徽四创电子股份有限公司(简称四创公司)成功研制了基于新一代天气雷达(CC型号)的C波段双多基地多普勒雷达硬件系统,并于夏季在安徽省合肥地区开展了外场试验,获取了该系统的第一手资料。本文为了检验该系统探测低层风场和三维风场的能力,并建立配套的双多基地多普勒雷达资料分析和风场反演系统,研究了双多基地多普勒雷达资料分析和处理技术,研制了基于三维变分方法的风场反演系统,进行了数值模拟试验,并利用该系统获取的资料进行资料分析和风场反演试验。

2 双多基地多普勒雷达系统和外场试验

该系统由一部新一代天气雷达(CC型号)和两部侧向接收系统组成。主动雷达发射的雷达波在遇到降水粒子后向各个方向散射信号,其中主动雷达接收其后向散射信号,被动接收系统接收侧向散射信号,这样就可以同时探测到该散射体的三个不同方向的径向速度。该技术的关键是三个分系统的同步技术,四创公司研制的双多基地多普勒雷达系统由GPS信号来控制三个分系统的同步接收。目前,三个分系统获取的径向速度和回波强度资料独立存储,事后进行资料分析和风场反演。为了保证配对的准确率,在原始资料中给出了各个径向精确到0.1 ms(毫秒)的径向速度获取的时间。该系统主要参数如表1所示,由于被动接收系统无法根据信号的来向转动,所以要求在水平和垂直方向上有很宽

表 1 双多基地多普勒雷达系统主要参数
Table 1 Parameters of the bistatic radar system

主动雷达 Main radar		被动接收系统 Bistatic receiver	
波长 Wavelength	5.5 cm	波长 Wavelength	5.5 cm
天线增益 Gain	44 dB	天线增益 Gain	20 dB
波瓣宽度 Beam width	1.0°	波瓣宽度 Beam width	水平 Horizontal 50° 垂直 Vertical 4°
径向平均对数 Number of samples	32	径向平均对数 Number of samples	32
距离库长 Bin length	150 m	取样时间 Sample period	1 μs
脉冲重复频率 PRF	1300 Hz		

的接收角度，以保证接收大范围的雷达侧向散射信号，但这样带来的问题是：天线增益变小，探测弱信号和抗干扰能力下降，后果是探测距离变小，易受旁瓣影响。

图 1 给出该系统外场试验的空间位置分布，主动雷达位于安徽省合肥市四创公司(31°45′41″N, 117°21′11″E)，两个被动接收系统分别设置在试验场 A 点(31°57′55″N, 117°21′31″E)和试验场 B 点(31°50′31″N, 117°3′35″E)，在主动雷达的北部和西北部，距主动雷达约为 10 km 和 22 km。外场

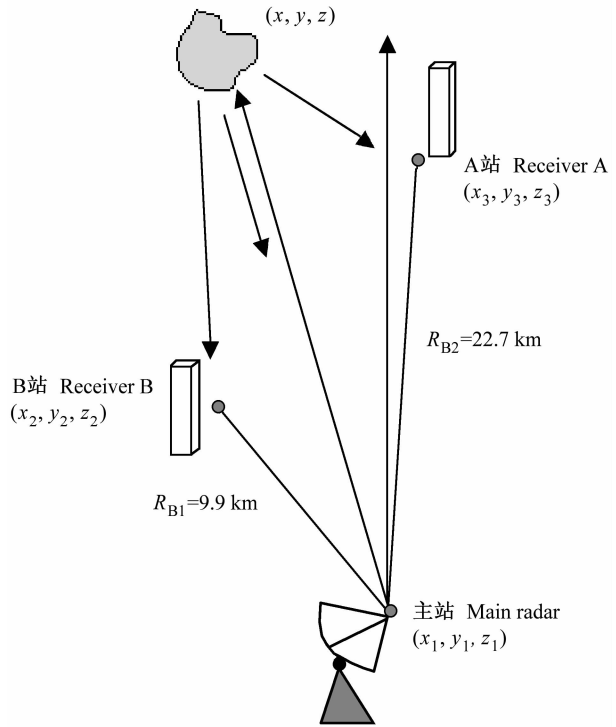


图 1 双多基地多普勒雷达外场试验布点示意图
Fig. 1 Stretch map of bistatic radar system in the field experiment

试验的主要目的是试验双多基地多普勒雷达的性能，获取实际资料，利用实际资料进行风场反演试验，验证该系统探测三维风场中尺度结构的能力。

3 双多基地多普勒雷达资料处理和风场反演方法

本文研制的风场反演系统由如下子系统组成：

(1) 雷达资料质量控制和预处理 该子系统的主要任务是检查雷达资料点数是否满足风场反演的要求，对雷达资料进行退模糊处理，最后检查雷达资料退模糊的效果，如果有明显的速度不连续现象，给出标识。另外，利用主动雷达和侧向接收系统探测的回波强度比及与空间位置的关系，来剔除旁瓣影响区域的方法正在研制过程中。

(2) 反演风场区域的确定 双多基地多普勒雷达风场反演的误差除与主动雷达和侧向接收系统测量径向速度误差有关外，还与反演格点的空间位置有关，设反演格点与主动雷达和侧向接收系统连线的夹角为 β ，根据 Satoh^[16] 的工作，则水平风场反演误差为

$$\frac{\sigma_u + \sigma_v}{\sigma_1 + \sigma_m} = \frac{\cos\beta + 3}{\sin^2\beta}, \quad (1)$$

其中， σ_u 、 σ_v 表示水平风场 u 、 v 分量的均方差误差， σ_1 、 σ_m 为主动雷达和被动接收系统测量径向速度的均方差误差。假设三个分系统探测径向速度的标准差为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，分别计算空间各个点主动雷达与两个侧向接收系统配对时的误差，取两个误差的最小值作为该系统的风场反演误差，得到风场反演的标准差的分布(图略)，我们确定 3 倍雷达误差的风场反演误差为反演其区域。对于该系统的分布，风场反演区为 $70 \text{ km} \times 40 \text{ km}$ 的区域。

(3) 雷达资料的配对 主动雷达发出的雷达信号在遇到降水粒子时，向各个方向散射出去，主动雷达接收到后向散射回来的信号，而两个侧向接收系统则接收到侧向散射出来的信号。在资料处理时，必须把三个分系统接收的来自同一散射体的信号进行配对，以便进行风场反演。由于主动雷达和两个侧向接收系统探测到的回波强度和径向速度的资料是分别存贮的，为了保证准确配对，该雷达系统利用 GPS 系统授时信号来保证三个雷达同时接收径向速度资料，也就是说三个接收系统是同时接收到这个径向的第一个距离库信号的，但值得注意的是：同时接收的信号并不

一定是来自同一个散射体。雷达资料配对主要分两个步骤,首先进行径向配对,根据每个主动雷达的径向资料的时间(记录在每个径向资料的资料头中),找到两个侧向接收系统最接近主动雷达该径向时间的径向资料;然后进行距离库配对,计算每个距离库离三个分接收系统的距离,并根据距离差进行配对。

假设主动雷达和某一个侧向接收系统在同一坐标上的位置分别为 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) , 则对于任意一个主动雷达距离库 i [由方位、仰角计算出空间位置 (x, y, z)] (参见图 1), 对应的侧向接收系统的距离库 n 由下式计算得到:

$$R_T = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}, \quad (2)$$

$$R_B = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2}, \quad (3)$$

$$n = i + \frac{R_B - R_T}{2 \times \Delta r}, \quad (4)$$

其中, R_T 、 R_B 为散射体距主动雷达和侧向接收系统的距离, Δr 为雷达的距离库长。这样该系统就将分别记录的雷达原始资料配对成一一对应的三个回波强度和径向速度资料对, 为风场反演做好了准备。

(4) 三维变分风场反演方法 首先利用 Cressman 方法将配对的雷达原始资料(以球坐标表示)进行空间插值, 插值到水平格距为 500 m、垂直格距为 250 m 直角坐标上。

考虑到雷达测量径向速度的误差, 该风场反演系统采用了三维变分方法, 同时考虑三个径向速度, 将三个径向速度作为弱约束, 通过极小化雷达观测的三个径向速度和模式预报量之间的差异, 来计算水平风场分量 u 、 v , 然后将质量连续方程作为强约束, 计算垂直速度, 再将该过程进行循环, 来反演三维风场。价值函数的表达式为

$$J = \sum_i (V_{r1,i} - V'_{r1,i})^2 W_{1,i} + \sum_i (V_{r2,i} - V'_{r2,i})^2 W_{2,i} + \sum_i (V_{r3,i} - V'_{r3,i})^2 W_{3,i}, \quad (5)$$

$$V_{r1} = \sin \alpha_1 \cos e_1 u + \cos \alpha_1 \cos e_1 v + \sin e_1 w, \quad (6)$$

$$V_{r2} = \frac{\sin \alpha_1 \cos e_1 + \sin \alpha_2 \cos e_2}{2 \cos(\beta_2/2)} u + \frac{\cos \alpha_1 \cos e_1 + \cos \alpha_2 \cos e_2}{2 \cos(\beta_2/2)} v + \frac{\sin e_1 + \sin e_2}{2 \cos(\beta_2/2)} w, \quad (7)$$

$$V_{r3} = \frac{\sin \alpha_1 \cos e_1 + \sin \alpha_3 \cos e_3}{2 \cos(\beta_3/2)} u + \frac{\cos \alpha_1 \cos e_1 + \cos \alpha_3 \cos e_3}{2 \cos(\beta_3/2)} v + \frac{\sin e_1 + \sin e_3}{2 \cos(\beta_3/2)} w, \quad (8)$$

其中, 价值函数计算区域为利用(1)式确定的范围, α_1 、 e_1 为主动雷达的方位和仰角, α_2 、 e_2 、 α_3 、 e_3 分别是反演的格点位置对于两个被动接收系统的方位和仰角, β_2 、 β_3 分别为散射体与主动雷达和第一个被动接收系统及第二个被动接收系统连线的夹角。风场水平分量 u 、 v 为控制变量, 每个格点上的垂直速度 w 在这里作为固定值处理, 然后由下式计算。

在计算垂直速度时, 采用从最底层向上积分和从云顶向下积分相结合的方法, 并确定一定的权重, 以保证垂直速度的可靠性。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial(\ln \rho)}{\partial z} w, \quad (9)$$

$$w = \left(1 - \frac{z}{z_{\text{top}}}\right) w_{\uparrow} + \left(\frac{z}{z_{\text{top}}}\right) w_{\downarrow}, \quad (10)$$

其中, ρ 为空气的密度, $w_{\uparrow}$ 、 $w_{\downarrow}$ 分别为向上和向下积分计算出来的垂直速度, z 为反演位置的垂直高度, z_{top} 为向下垂直积分开始时的高度, 即假定垂直速度为零的高度, 通常取回波顶高。

采用变分方法的主要优势体现在如下几方面: 一是可以利用任意两个径向速度作为约束, 也可以将三个径向速度甚至更多个径向速度同时作为约束, 提高风场反演的精度和增大反演区域; 二是可以很方便地将其他方程如动力约束、回波强度约束作为弱约束加到价值函数里, 以改善风场反演的质量; 三是这种方法可以用双多基地多普勒雷达进行风场反演, 也可以单独使用单主动雷达径向速度来反演风场, 以将风场反演区域扩展到双多基地雷达覆盖区以外。下面首先利用中尺度数值模式输出结果来检验该风场反演方法的效果。

4 双多基地多普勒雷达风场反演系统的检验

将美国俄克拉荷马大学研制的 ARPS (Advanced Regional Prediction System) 模式模拟的一

次 1977 年 5 月 20 日 Del 城 Oklahoma 龙卷过程的风场作为“真值”，来检验本文研究的风场反演方法，特别是垂直速度反演的效果^[17]。在双多基地多普勒雷达配置保持外场试验的相对位置不变的前提下，首先根据模式输出风场计算雷达三个分系统探测到的径向速度，然后将得到的径向速度作为输入资料，用风场反演方法进行三维风场反演，并与模式输出结果进行对比。价值函数极小化迭代次数最大设置为 50 次。

该模式输出资料的水平和垂直格距分别为 1 km 和 0.5 km，模拟的中尺度涡旋结构很明显，最大上升速度达到 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。选择这种风场结构比较复杂的过程进行模拟的目的是研究双多基地多普勒雷达系统探测中尺度风场的能力，特别是对上升速度和下沉速度的反演能力。图 2 给出了 2 km 高度上水平风场和垂直速度的 ARPS 模式输出结果和双多基地多普勒雷达风场反演结果的对比，从图中可以看出：双多基地多普勒雷达系统成功反演出了两个中尺度涡旋系统，涡旋附近的上升和下沉区反演都很合理，上升速度空间分布比较一致，但反演的上升速度和下沉速度的最大值比较小，这可能与在计算水平辐合方案有关。图 3 给出了通过上升

气流中心的风场垂直结构的对比结果，反演的上升气流结构和模式结果比较一致，这主要是来自两个方向垂直积分对垂直速度计算的贡献。同时，单独使用一个方向积分垂直速度的结果还显示：垂直速度中心的反演结果不太理想，特别是随着积分累积，垂直速度的偏差越来越大。定量统计分析表明：在最低的 10 层(5 km 高度内)，水平风场的均方根误差为 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，垂直速度风场为 $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；在 11~20 层(5~10 km 高度内)，水平风场的均方根误差为 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，垂直速度风场为 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，水平和垂直速度误差发生在垂直速度最大的区域。也就是说，随着高度的增加，水平和垂直风场的误差变大。其原因是随着高度的增加，雷达观测的仰角越来越大，垂直速度对径向速度的贡献也逐渐变大，误差主要来源是垂直速度对径向速度的影响。因为在用模式输出量计算径向速度时，考虑了垂直速度对径向速度的贡献，而在第一次用变分方法计算水平速度时，垂直速度初猜值为零，没有考虑垂直速度对径向速度的贡献。虽然经过两次循环，对质量连续风场进行积分计算出垂直速度，由于计算水平辐合的误差影响，仍不能完全复原原来的垂直速度。

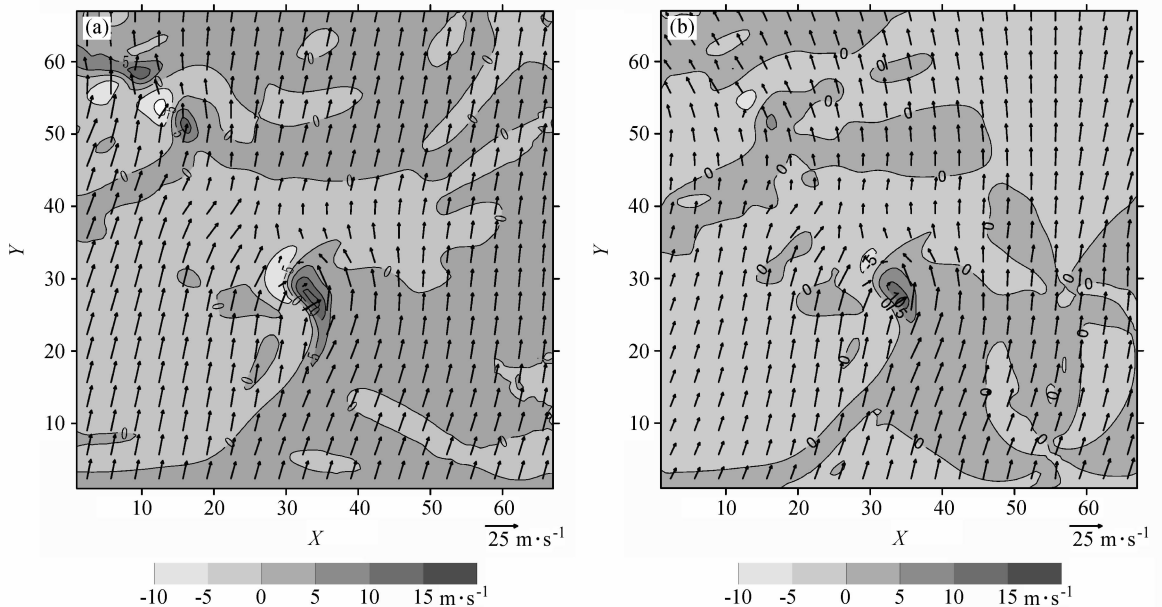


图 2 2 km 高度上水平风场“真值”(a)和双多基地多普勒雷达反演结果(b)的对比。背景表示垂直速度，正值表示上升速度，负值表示下沉速度。坐标为格点数。X 表示东西方向的格点，格距 1 km，Y 表示南北方向的格点，格距为 1 km

Fig. 2 The “truth” horizontal wind fields at height of 2 km (a) and retrieved wind fields (b). The background color is for vertical velocity, positive is upward and negative is downward. X and Y are respectively grid numbers along east-west and north-south directions with grid spacing of 1 km

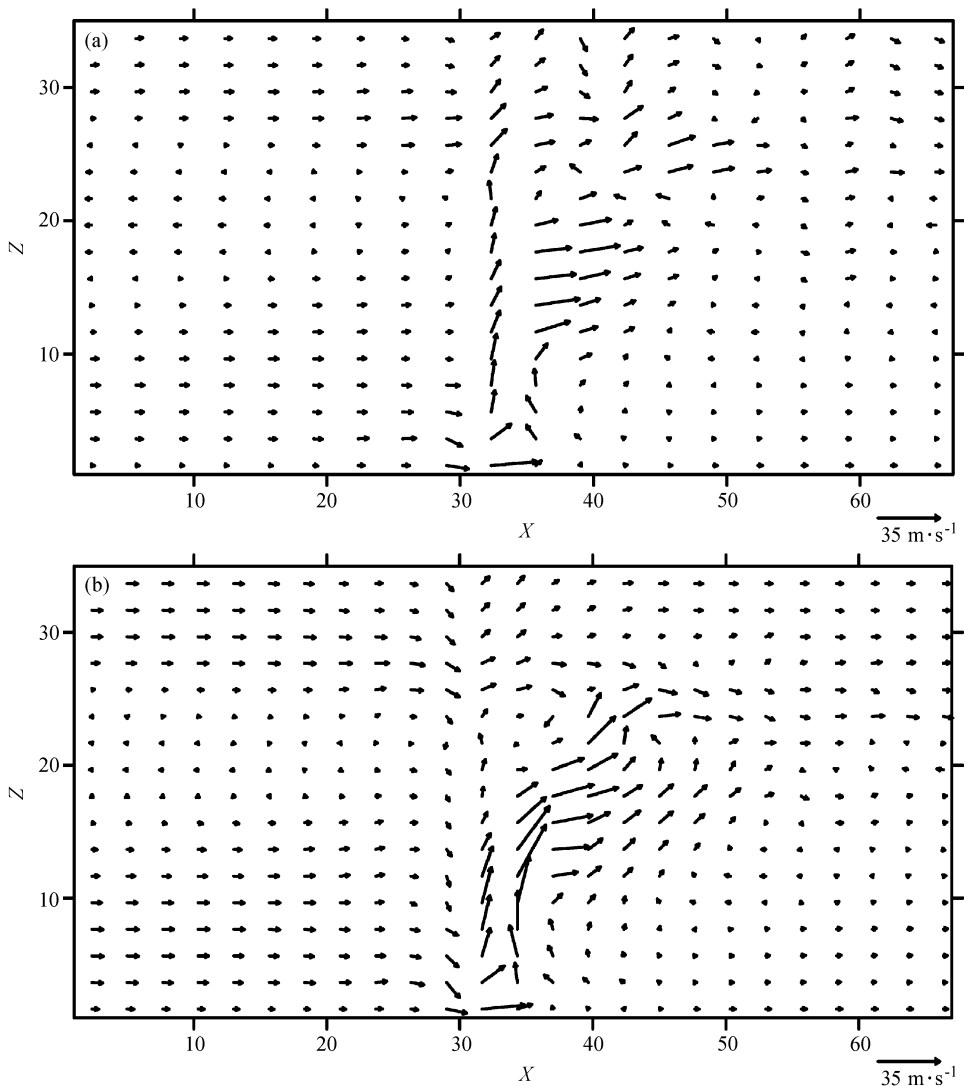


图 3 通过上升速度中心($Y=28$)的垂直速度场的对比: (a)“真值”; (b)反演。X 表示东西方向的格点, 格距 1 km, Z 表示垂直方向的格点, 格距为 0.5 km, $Z=1$ 表示模式第 1 层

Fig. 3 The “truth” vertical wind fields along $Y=28$ (a) and retrieved wind fields (b). X is grid number along east-west direction with grid spacing of 1 km, Z is grid number along vertical direction with grid spacing of 0.5 km, and $Z=1$ is for the first layer of the model

通过模拟研究, 证明了在雷达测量径向速度没有系统误差的前提下, 该系统完全可以反演出降水系统的中尺度风场结构, 特别是低层的水平和垂直风场结构。

在此基础上, 我们利用随机函数人为随机引进径向速度的随机测量误差, 来研究径向速度的统计误差对风场反演的影响。具体作法是: 利用随机函数, 在三个雷达分系统探测径向速度的每个点上随机引入最大为 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的随机误差, 运行模式, 计算得出一个风场分布, 这样的试验进行 100 次, 然后统计分析误差的大小和空间分布。图 4 给出了使

用三个分系统的资料和使用一个主动雷达和一个被动接收系统的反演水平风场的均方差误差。从结果可以看出: 利用一个主动雷达和一个被动接收系统时的水平风场反演误差分布和公式(1)给出的理论结果很吻合, 在雷达基线和远离雷达时, 误差比较大。使用两个被动接收系统资料的结果要优于使用一个主动雷达和一个被动接收系统的结果, 特别是弥补了反演区雷达基线附近很大的反演误差区, 其他区域的误差也小于使用一个被动接收系统时的反演误差。垂直速度的误差主要与垂直速度大小有关(图略)。

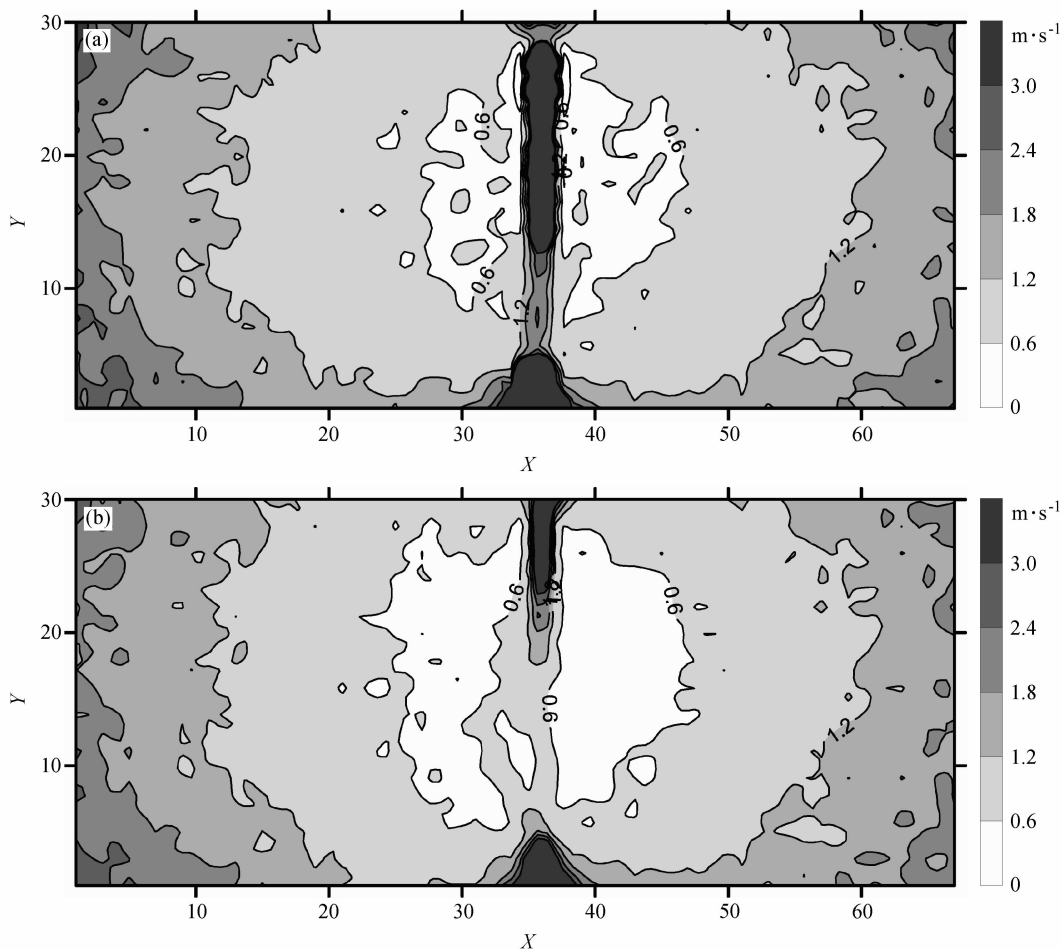


图4 引入随机误差后同时使用三个分系统资料(a)和使用一个主动雷达和一个被动接收系统的水平风场反演误差(b) ($H=2$ km)。X 表示东西方向的格点, 格距 1 km, Y 表示南北方向的格点, 格距为 1 km

Fig. 4 The errors of retrieved horizontal wind fields induced by random errors by using radar data of three receivers (a) and one main radar and one bistatic receiver (b) ($H=2$ km). X and Y are respectively grid numbers along east-west and north-south directions with grid spacing of 1 km

5 资料分析和反演效果

5.1 资料配对的效果

为了检验双多基地多普勒雷达资料的质量及其配对算法的可靠性, 我们以 2004 年 5 月 26 日 14:55 (北京时, 下同) 资料为例, 选择空间变化大的径向资料, 以三个分系统探测的回波强度在空间的一致性、回波强度随距离变化趋势等来判断资料的质量和配对的效果。从回波强度显示来看, 配对后三个分系统测量的回波强度按主动雷达方位、仰角和距离显示的回波位置、强度变化趋势很一致。为了定量比较, 图 5 给出了 2004 年 5 月 26 日 14:55 通过强回波中心的径向上配对后的回波强度随主动雷达距离的变化(方位 32° , 仰角 5°)。我们知

道: 侧向接收系统测到的回波强度除由散射体本身降水粒子大小、浓度和相态有关外, 还与散射角度、雷达波的偏振方向等因素有关, 但这些因素对回波强度的影响是缓慢的, 通过回波强度沿径向快速的变化就可以判断硬件系统同步和配对的可靠性。从图 5 可以看出: 三个分系统测到的回波强度上升沿的变化很一致, 主动雷达(实线)和第一个侧向接收系统(B 试验站, 点线)的下降沿也很一致, 但第二个接收系统(A 试验站)探测的回波强度(长划线)过早下降, 下降沿结束位置差不多, 邻近方位的结果也很一致。从通过 90° 方位的回波强度变化来看: 第二个接收系统探测的回波强度变化和主动雷达的很一致, 但第一个接收系统没有探测到这一孤立的回波, 这说明散射体的空

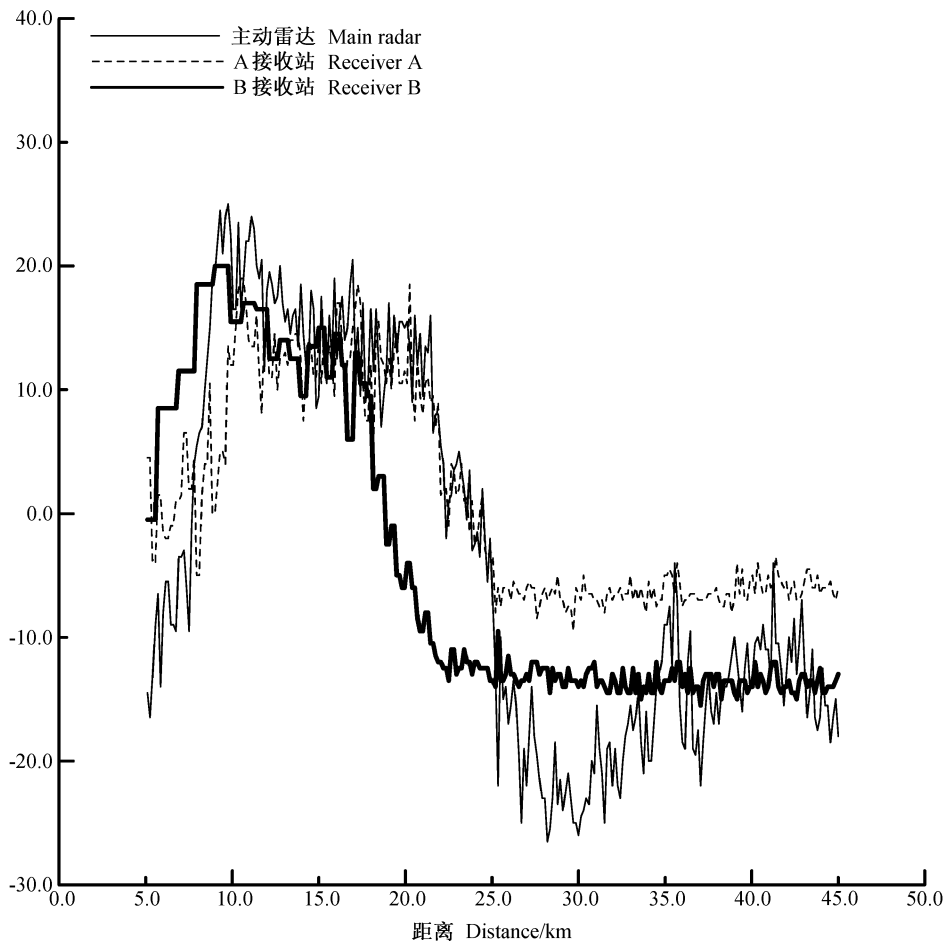


图 5 2004 年 5 月 26 日 14:55 三个分系统资料配对的回波强度(单位: dBZ)的对比(方位: 32°).

Fig. 5 Comparison of processed reflectivity (units: dBZ) of three receivers at 1455 Beijing Time (BT) 26 May 2004 (azimuth: 32°)

间位置影响很大。综合这一个例的资料配对情况可以看到：资料配对效果很好，该系统的同步观测技术和配对方法是可信的。

5.2 风场反演的效果

下面，我们利用 2004 年 5 月 26 日 14:55 的 5° 仰角平面位置显示 (PPI) 资料来反演两维水平风场，检验反演不同高度上风场的变化及利用不同雷达资料反演风场的差异，目的是分析三个分系统探测的径向速度是否存在明显的系统误差，反演结果是否合理。从主动雷达的径向速度 PPI 分布可以很明显地看出：本次系统的风场水平比较均匀，但垂直切变比较明显。我们通过改变价值函数中的权重就可以从一个时次的雷达资料中得到不同的风场结果，如果三个权重全部为 1，得到的风场就是同时使用三个径向速度的风场反演结果，如果将一个权重设置为 0，则是利用另外两个径向速度得到的

风场结果。图 6 给出了同时利用三个分系统资料 (方案 1)、利用主动雷达和 A 试验站 (方案 2)、主动雷达和 B 试验站 (方案 3) 分别反演的结果，本过程只进行了 4° 和 5° 的 PPI (等仰角观测) 观测，图 6 给出的是 5° 仰角 PPI 上的水平风场，其中忽略了垂直速度的影响，图的背景为主动雷达的径向速度。从两个从站的回波强度资料来看：A 点资料没有明显受到主动雷达旁瓣的影响，而 B 试验站从站探测到的回波强度在 330° 到 30° 方位范围内出现异常的高值，而且对应的径向速度也为零，据初步分析可能是主动雷达旁瓣直接打到侧向接受天线上，使侧向接受天线测量的径向速度为零而回波强度很大，对于这种主动雷达旁瓣对侧向接受系统测量的影响，我们正在研究用回波强度对比方法进行后处理的软件系统。

比较三种不同方法的反演结果可以看出：方案

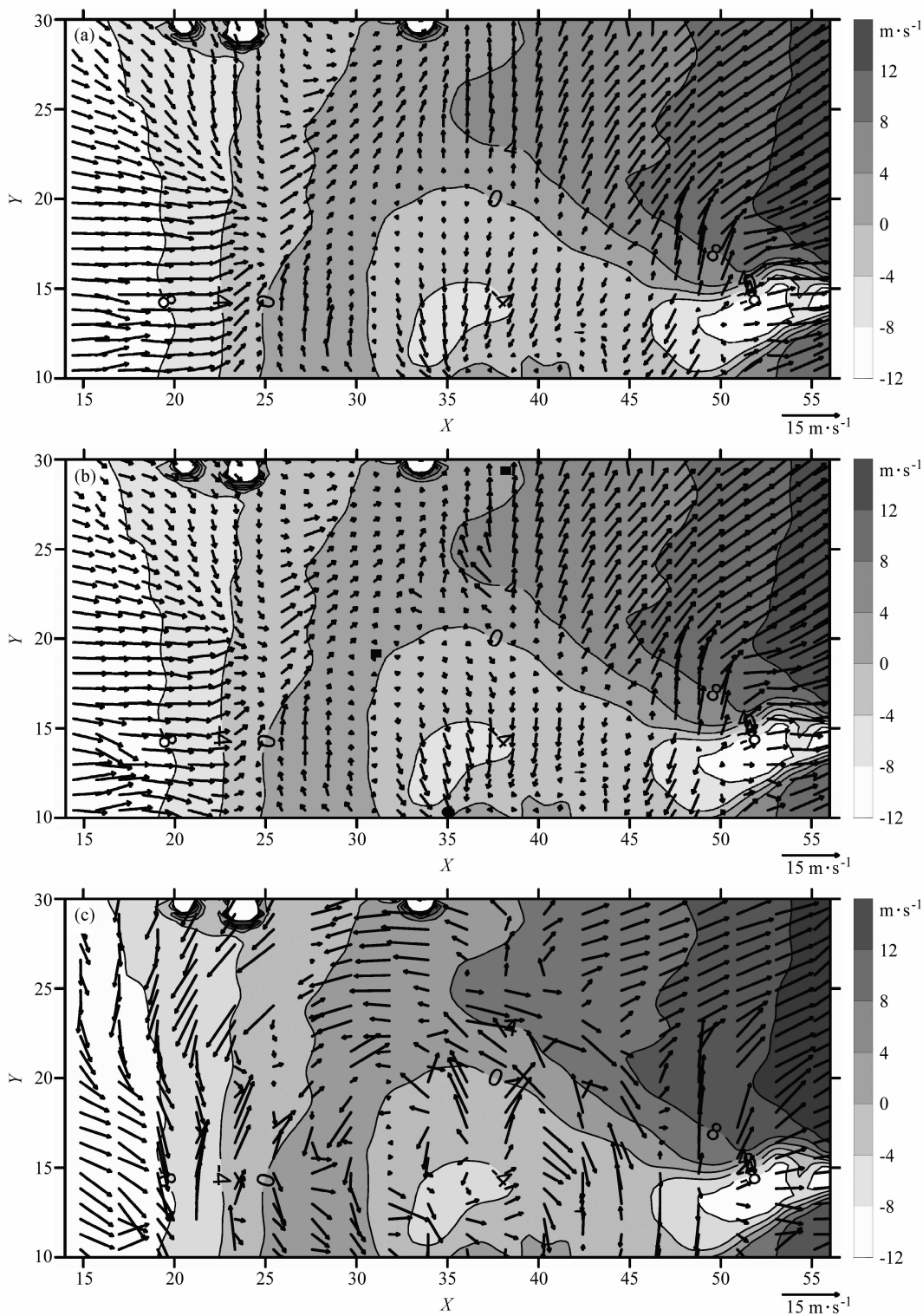


图 6 2004 年 5 月 26 日 14:55(北京时间)的 5°仰角 PPI 的两维水平风场: (a) 使用三个径向速度资料反演的结果; (b) 利用主动雷达和 A 站径向速度反演的结果; (c) 主动雷达和 B 点径向速度的风场反演结果。背景为主动雷达的径向速度, 负值用虚线标出。主动雷达和从站在 (b) 中分别用圆点和小方块标出。X 表示东西方向的格点, 格距 1 km, Y 表示南北方向的格点, 格距为 1 km

Fig. 6 Retrieved horizontal wind field in PPI with 5° elevation at 1455 BT 26 May 2004: (a) By using radial velocity data of three receivers; (b) by using data from main radar data and receiver A; (c) by using data from main radar data and receiver B. Locations of main radar and two bistatic receivers are marked with circle and rectangle in (b). X and Y are respectively grid numbers along east-west and north-south directions with grid spacing of 1 km

1 和方案 2 反演的风场的空间分布很相似, 同时方案 3 在部分未受旁瓣影响的区域(左下和右上角)风场反演的结果与方案 1 和方案 2 也很相似, 这说明三个分系统探测的径向速度没有明显的系统误差。为什么受主动雷达旁瓣影响的径向速度没有影响方案 1 的反演结果? 主要原因是干扰区正好在主动雷达和 B 试验站雷达基线附近, β_2 接近 180° , 控制变量 u 、 v 很小的变化就会产生价值函数很多的变化, 在这一区域, B 试验站的径向速度对风场反演的贡献很小, 起主要作用的是 A 试验站的数据。

因为本次过程只得到了 PPI 上的风场, 而且从主动雷达的径向速度可以分析出风场水平比较均匀, 所以我们主要分析反演风场的垂直变化。从风场随高度(对应于不同距离)变化来看, 近地层的北风随着高度增加逐渐变小, 到 450 m(雷达距离 5 km)基本变为静风, 然后风速变大, 风向变为偏南风; 随着高度继续增加, 风速明显增大, 到 1500 m(离雷达 15 km), 风速达到 $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 风向为西风或西北风。这一趋势与从主动雷达径向速度的分析结果和速度方位显示方法(VAD)反演的垂直风场分析结果完全吻合。从这里可以看出: 与双多普勒雷达系统相比, 双多基地多普勒雷达系统在反演近地层风场方面有明显的优势, 而双多普勒雷达的两个主动雷达不能同时探测到很低的回波, 从而使反演近地层风场的能力受到很多的影响。

另外, 值得注意的是: 在图 6(50, 12)坐标附近正的径向速度区内, 出现了一块明显的负径向速度的二次回波, 雷达最大探测距离为 150 km, 该回波区距雷达约 10 km, 估计该回波是雷达旁瓣打到 160 km 处的低层强回波而产生的。

6 结论和讨论

本文研究了 C 波段双多基地多普勒雷达外场试验主动雷达和两个被动接收系统的资料配对方法, 研制了利用三维变分方法反演双多基地多普勒雷达三维风场的系统, 利用数值模拟结果并引入径向速度的随机误差, 对该系统反演风场中尺度结构的性能进行了模拟, 利用实际观测的双多基地多普勒雷达资料进行了风场反演试验, 结果表明:

(1) 该双多基地多普勒雷达同步观测技术可行, 三个分系统探测的回波信号配对结果合理, 回波空间分布很一致。

(2) 通过对一次龙卷风过程的模拟分析表明: 双多基地多普勒雷达可以反演出风场中尺度系统, 对水平风场反演精度很高; 在垂直速度值很大和水平风场切变比较大的区域, 水平和垂直风场的反演存在一定的误差, 垂直速度的反演误差与高度和实际垂直速度有关。多个接收系统同时观测既可以提高反演精度, 又可以弥补雷达基线附近风场反演“盲区”, 实现风场反演的连续性。

(3) 利用实际观测资料进行了不同方案的风场反演试验, 使用不同雷达资料得到的风场很相似, 反演的风场随高度的垂直变化趋势与主动雷达径向速度和 VAD 产品很一致。当同时使用多个侧向接受系统资料时, 在一个侧向接受系统基线区附近, 雷达旁瓣对径向速度的污染对风场反演影响不大, 但在单独使用这一污染径向速度时, 得到的风场很差。

应该指出的是, 本文涉及的研究工作是在外场试验后进行的, 目前, 该系统还不具有资料实时传输的功能, 我们还没有进行双多基地多普勒雷达实时反演风场的试验。要实现风场实时反演, 得到可靠的风场结果并应用于灾害性天气的监测和预警、机场的气象保障等目标, 我们还有很多工作需要做, 特别是雷达资料的质量控制, 如旁瓣影响和二次回波的识别和剔除等, 实时退速度模糊仍具有极大的挑战性。另外, 双多基地多普勒雷达反演的风场仍需要其他资料如双多普勒雷达反演风场的进一步检验和验证。

参考文献 (References)

- [1] Mueller C, Saxen T, Roberts R, et al. NCAR auto-nowcast system. *Weather and Forecasting*, 2003, **18**: 545~561
- [2] Waldteufel P, Corbin H. On the analysis of single-Doppler radar data. *J. Appl. Meteor.*, 1979, **18**: 532~542
- [3] Qiu C J, Xu Q. A simple adjoint method of wind analysis for single-Doppler data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1992, **9**: 588~598
- [4] Xu Q, Qiu C J, Yu J X. Adjoint-method retrievals of low-altitude wind fields from single-Doppler reflectivity measured during Phoenix II. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1994, **11**: 275~288
- [5] 姜海燕, 葛润生. 一种新的单部多普勒雷达的反演技术. 应用气象学报, 1997, **8**(2): 219~223
Jiang Haiyan, Ge Runsheng. A new retrieval technique for single-Doppler radar. *Journal of Applied Meteorological*

- Science* (in Chinese), 1997, **8**(2): 219~223
- [6] 白洁, 陶祖钰. 多普勒雷达风场反演 VAP 方法的资料预处理. *应用气象学报*, 2000, **11**(1): 21~26
Bai Jie, Tao Zuyu. The pre-processing of Doppler radar wind retrieval VAP technique. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2000, **11**(1): 21~26
- [7] Sun J, Crook N A. Real-time low-level wind and temperature analysis using single WSR-88D data. *Weather and Forecasting*, 2001, **16**: 117~132
- [8] Conway J W, Zrnić D S. A study of embryo production and hail growth using dual-Doppler and multiparameter radars. *Monthly Weather Review*, 1993, **121**: 2511~2528
- [9] 周海光, 张沛源. 笛卡儿坐标系的双多普勒天气雷达三维风场反演技术. *气象学报*, 2002, **60**(5): 585~593
Zhou Haiguang, Zhang Peiyuan. A new technique of recovering three-dimensional wind fields from simulated dual-Doppler radar data in the Cartesian space. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60**(5): 585~593
- [10] 刘黎平, 阮征, 覃丹宇. 长江流域梅雨锋暴雨过程的中尺度结构个例分析. *中国科学 D 辑*, 2004, **34**(12): 1193~1201
Liu L P, Ruan Z, Qin D Y. Case study on mesoscale structures of heavy rainfall system in Yangtze River Generated by Meiyu front. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2004, **34**(12): 1193~1201
- [11] Gal-Chen T. Errors in fixed and moving frame of references: Applications for conventional and Doppler radar analysis. *J. Atmos. Sci.*, 1982, **39**: 2279~2300
- [12] Wurman J, Heckman S, Boccippio D. A bistatic multiple-Doppler radar network. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, **32**: 1082~1814
- [13] Protat A, Zawadzki I. A variational method for real-time retrieval of three-dimensional wind field from multiple-Doppler bistatic radar network data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1999, **16**(4): 432~449
- [14] De Elia R, Zawadzki I. Sidelobe contamination in bistatic radars. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2000, **17**: 1313~1329
- [15] Takaya Y, Nakazato M. Error estimation of the synthesized two-dimensional horizontal velocity in a bistatic Doppler radar system. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2002, **19**: 74~79
- [16] Satoh Shinsuke, Joshua Wurman. Accuracy of wind fields observed by a bistatic Doppler radar network, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2003, **20**(8): 1077~1091
- [17] Klemp J B, Rotunno R. A study of the tornadic region within a supercell thunderstorm. *J. Atmos. Sci.*, 1983, **40**: 359~377