

北京大学学报(自然科学版), 第 41 卷, 第 2 期, 2005 年 3 月

Acta Scientiarum Naturalium

Universitatis Pekinensis, Vol. 41, No. 2 (Mar. 2005)

单多普勒雷达 VAP 方法反演水平风场的检验¹⁾

刘淑媛²⁾ 刘黎平³⁾ 郑永光⁴⁾ 陶祖钰⁴⁾

(²⁾ 空军气象中心, 北京, 100843; (³⁾ 中国气象科学研究院, 北京, 100081;

⁴⁾ 北京大学物理学院大气科学系, 北京, 100871)

摘 要 利用长江中下游外场实验的多普勒雷达联合观测资料, 检验使用 VAP (Velocity- Azimuth Process) 方法反演中-B 尺度 (20~ 200 km) 水平风场的可靠性。局地均匀风假定的合理性分析表明, 在 125 km 以内 VAP 方法反演的水平风场的分辨率可以满足中-B 尺度 (20~ 200 km) 分辨率的需求。多种方式检验表明, 单多普勒雷达 VAP 方法反演出的水平风场可以正确地反映风场中的中-B 尺度结构, 作为分析中尺度风场信息的依据。

关键词 多普勒雷达; 反演风场; 中尺度

中图分类号 P 445

0 引 言

多普勒雷达只能提供风场径向速度分量的信息, 因此从速度场反演风场是多普勒雷达应用的关键技术。但由于没有其他实测风场的时空分辨率及范围可以和多普勒雷达相匹配, 因此单多普勒风场反演的检验成为一个没有解决的难题, 严重阻碍了单多普勒雷达在风场探测方面的应用。973 国家重点基础研究项目 (2001) 2002 年长江中下游地区暴雨野外观测试验在资料分析中的一个目标就是完成一套实用的单多普勒雷达资料处理系统, 以方便各气象台站使用, 而其中如何选择一种可以满足实时观测并且结果可靠的风场反演方法则是进行资料处理的基础。

目前水平风场反演方法已经有很多种, Waldteufel^[1] 提出在至少 7 个扫描仰角的立体扫描下, 假定扇形体积内风场线性, 对方位角间隔约为 30° 的扇形体积中的数据, 计算的平均风和散度的 VVP (Velocity Volume Processing) 方法。但此方法仅适用于大范围多仰角的立体扫描, 同时分辨率太小 (30 km @ 30 km), 不符合中尺度分析的要求。强大的计算量也是此方法的一个缺点。Person^[2] 提出极坐标下计算低仰角水平风场的 UW 方法。但由于加入了风场无辐散的假定, 必然使反演的风场不能很好地反映真实中小尺度的信息。Sun 等^[3] 提出四维同化的方法计算三维风场和温度场。由于采用完整闭和的大气运动方程组作为控制方程, 假定少, 可以用于不同天气过程的反演。但计算量大不适合于业务的时时运行监控。Qiu 等^[4] 人提出 SA (Simple Adjoint) 方法; Alan Shapiro^[5] 提出 4D VAR 方法, 这些方法同样存在计算量大的问题。姜

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.

1) 国家自然科学基金 (40233036) 和/ 973 基金 (G1998040907) 资助项目

收稿日期: 2004-02-09; 修回日期: 2004-03-03

海燕等^[6]利用极坐标下简化的二维涡度和散度方程反演水平风场。但这种方法由于对涡度作了较大的简化,对于涡旋场反演将会出较大误差。另外,此方法反演的结果还依赖初始条件的给定。陶祖钰提出在假定反演廓线上的相邻 $2\Delta H$ 的方位角速度相等(局地均匀)条件下,忽略雨滴降落速度,计算水平风分量的 VAP 方法^[7]。

目前反演水平风方法中, VAP 方法计算简便、快捷,可以在微机上很容易的实现,如果反演结果可靠,可以为单多普勒雷达反演风场的业务应用提供一种方便的选择。为此,下面从多方面检验 VAP 方法反演的水平风场的正确性。首先,分析 VAP 方法反演风的分辨率的可用范围,然后选择了以下 5 种检验方式:与常规天气图风场形势比较;从反演的水平风场反算出径向速度分布与原始径向速度进行比较;利用原始径向速度图像对反演的水平风场做定性判断;与双多普勒雷达观测资料反演的水平风场对比;与单站探空比较。

1 VAP 方法基本原理及局地均匀风假定的合理性分析

1.1 基本原理

VAP 方法是在假定反演廓线上的相邻 $2\Delta H$ 的方位角速度相等(局地均匀)条件下,忽略雨滴降落速度,计算水平风向、风速。若规定径向风向 $v_r > 0$ 趋近雷达, $v_r < 0$ 远离雷达, A 为水平径向速度 v_{hr} 与水平风矢量 v 的夹角, H 为方位角。则:

水平风速

$$v = \left| \frac{V_{hr1} - V_{hr2}}{2\sin A \sin \Delta H} \right|,$$
$$\begin{cases} A = \arctan a_n, & V_{hr1} - V_{hr2} > 0, & V_{hr1} + V_{hr2} > 0; \\ A = \arctan a_n + P, & V_{hr1} - V_{hr2} > 0, & V_{hr1} + V_{hr2} < 0; \\ A = \arctan a_n, & V_{hr1} - V_{hr2} < 0, & V_{hr1} + V_{hr2} > 0; \\ A = \arctan a_n - P, & V_{hr1} - V_{hr2} < 0, & V_{hr1} + V_{hr2} < 0; \end{cases}$$

其中

$$a_n = \tan A = - \frac{V_{hr1} - V_{hr2}}{V_{hr1} + V_{hr2}} \cot \Delta H$$

1.2 局地均匀风假定的合理性分析

单雷达反演风场的目标就是为识别中-A 尺度(200~ 2 000 km)和中-B 尺度(20~ 200 km)的天气系统,因此要求风场反演的分辨率大于 10 km。VAP 方法反演风是在极坐标下完成的,反演的水平风场局地均匀的假定是在所选取的弧线段内一个狭窄的扇形元内所做的假设,扇形元一般选取:径向的距离为雷达的库长;切向尺度选择的方位角在 $2b \sim 7b$ 之间,根据距离雷达的远近而调整。因此,下面从径向和切向两方面进行分辨率分析。

在径向, VAP 方法径向的距离分辨率是雷达的库长,而雷达的库长一般小于 1 km,径向的距离分辨率绝对满足区别中-A 尺度(200~ 2 000 km)、中-B 尺度(20~ 200 km)和中-C 尺度(2~ 20 km)的分辨率需求。

在切向,考虑到在雷达探测风资料分析时,一般使用在半径 125 km 左右以内的速度资料,因此下面就半径 125 km 以内范围进行切向分辨率分析。离雷达 x km 处,使用 Δb 的夹角,由于角度较小,则切向距离的长度近似代表切向分辨率值。其中,表 1 中给出的切向距离除固定(在 20~ 125 km 时长度固定为 6 km)外,给出的范围内切向距离值(表中黑体数字为固定的值)。

表 1 反演的水平风场的切向分辨率随距离变化

Table 1 Tangent resolution of the retrieved wind field along with distance

| r/km | HP(b) | d _{切向} /km |
|--------|-------|---------------------|
| < 10 | 7 | 214(10) |
| 10~ 20 | 6 | 411(20) |
| > 20 | 6~ 2 | 6 |
| 125 | 2 | 817 |

说明: 括号中给出的是计算切向距离时使用的半径。

可见, 在半径 125 km 以内 VAP 方法反演的水平风场的切向分辨率值小于 10 km, 局地均匀的假定只是光滑了单雷达反演不需要识别的 20 km 以下的中-C 尺度(次网格现象)的信息。因此, 在半径 125 km 以内的 VAP 方法反演的水平风场的分辨率可以满足分辨中-B 尺度(20~ 200 km)天气系统的需求。

2 VAP 方法反演水平风场的正确性检验

2.1 资料说明和天气形势概况

国家重点基础研究项目实施的 2001) 2002 年长江中下游地区暴雨野外观测试验中, 组织了双多普勒雷达联合观测。本文选用此次实验的 2002-07-22 的一次强降水过程中 22 日 00 时到 23 日 00 时宜昌和(国产 SA 型新一代天气雷达)荆州(国产 C 波段)多普勒雷达联合观测资料来做详细检验。其中单多普勒雷达观测资料来自宜昌雷达。

从天气形势上分析(图 1), 在这段过程中, 22 日 00 时在(100°E, 27°N)附近存在一个低压中心, 宜昌测站(111°11'E, 30°14'N)附近的流场是西南风、东风和东北风这样一个气旋式旋转的地区。12 时宜昌附近流场东北风的影响加大。宜昌测站以北以西均为东北气流, 只有东南存在西南和偏南气流。23 日 00 时一个低压中心移近宜昌, 宜昌位于低压中心东北部, 是西南风与东北风的转折处。可见在这段时间内宜昌附近的流场是主要风向是西南风向东风和东北风的转变, 东北风逐渐占据主要地位。在宜昌的东南 120 km 左右一直是西南低空急流带。

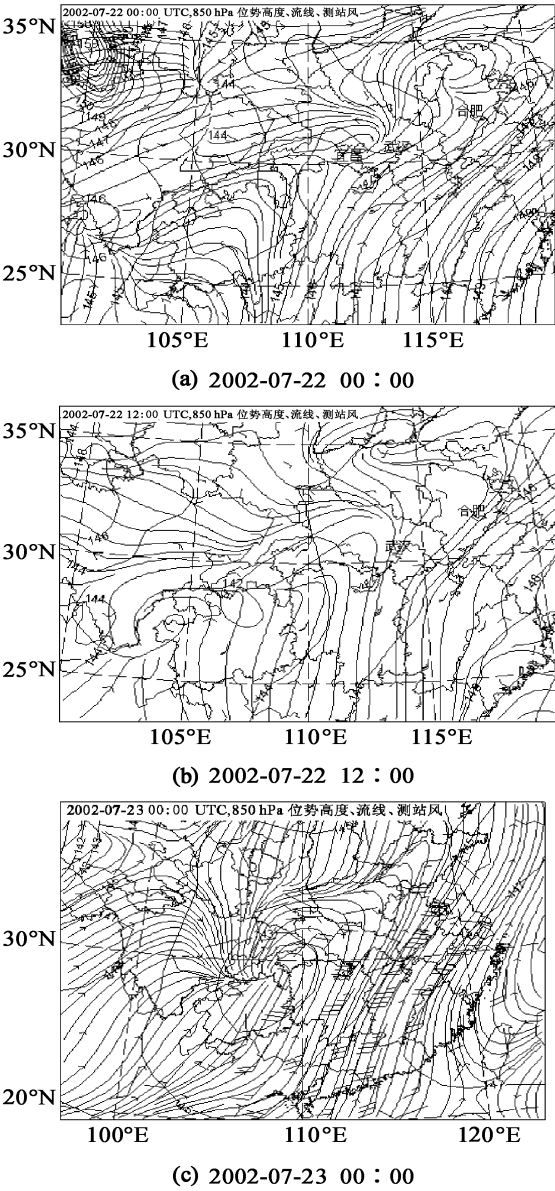


图 1 850 hPa 流线(矢量线)、测站风和等高线

Fig. 1 Wind stream, observed wind vector and isoline of the different Geopotential Height

在宜昌的东南 120 km 左右一直是西南低空急流带。

212 与常规天气图风场形势比较

首先,将雷达反演风场整体趋势(图 2(a)、(b)、(c)、(d))与客观分析的风场形势对比,分析反演风场的整体趋势正确性。由于 00 时雷达资料缺测太多,无法与雷达覆盖面积内客观分析的流场对比,因此在 00 时加入 03 时图对比分析。

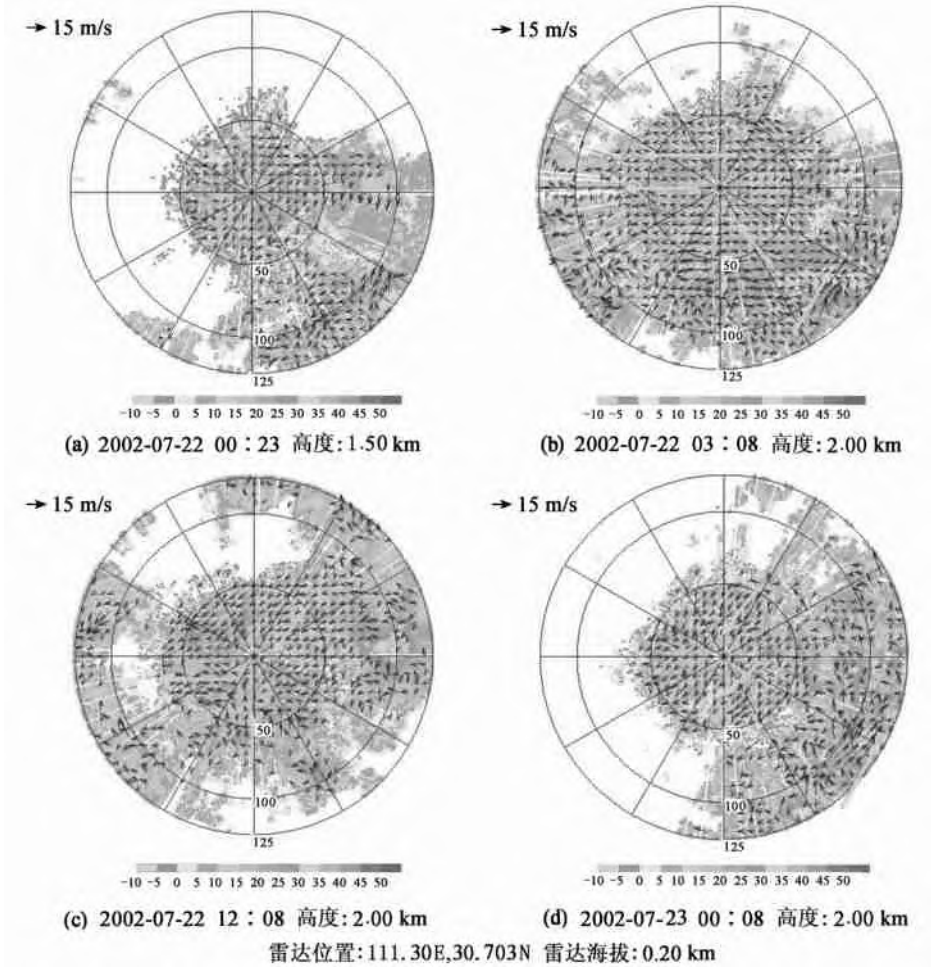
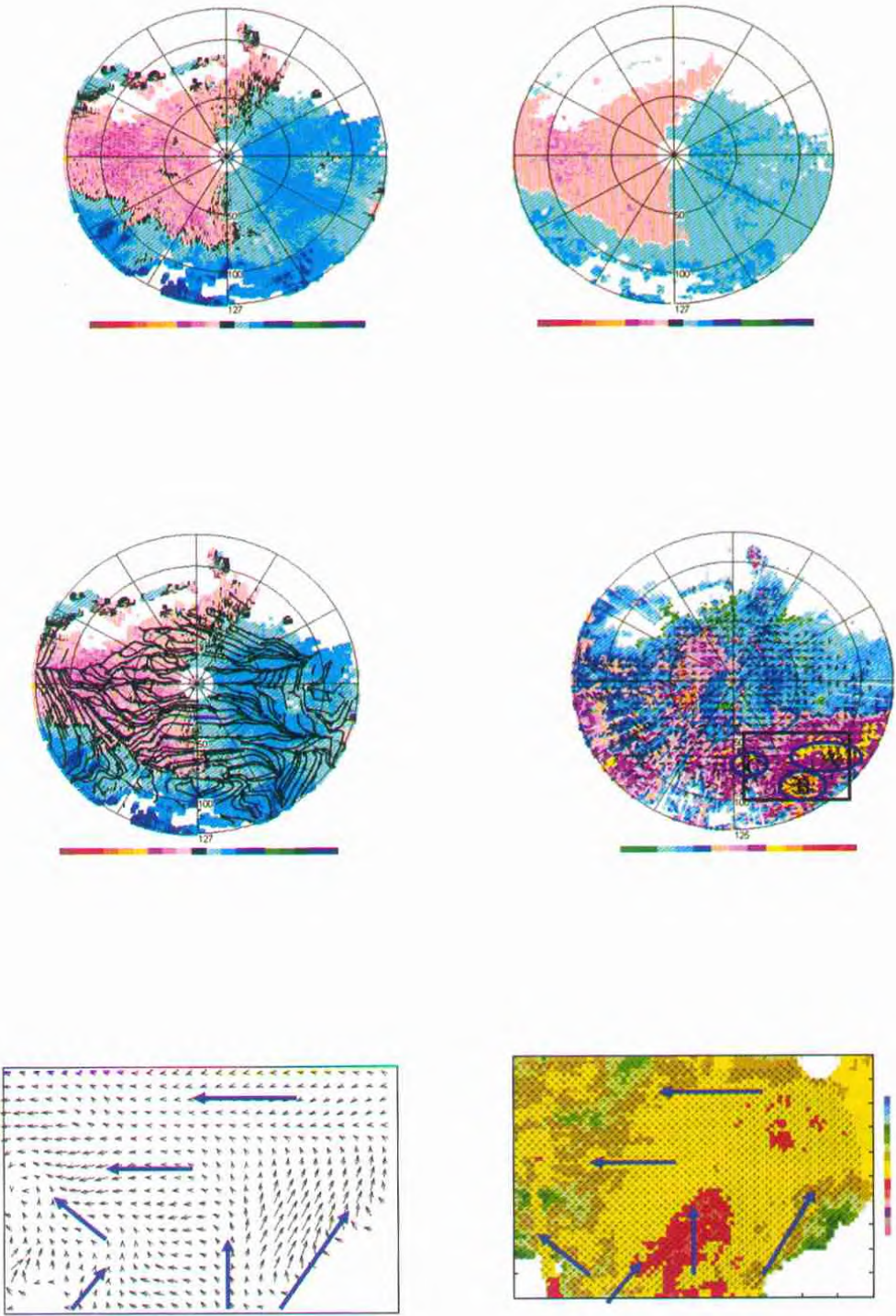


图 2 与客观分析场相近时刻反演的雷达水平风场与强度回波 (dBZ)
Fig. 2 The retrieved horizontal wind and reflectivity (dBZ)

从图 2(a)、(b)可以看到,在 00 时 23 分和 03 时 08 分整体风场 2 个时次(00、03 时)均为雷达东南部存在风速较大的西南风,雷达东部存在部分东风和东北风,雷达西部为东风和东北风。其分布和风向的转变与客观分析流场在宜昌附近的大环流形势(图 1(a))是一致的。在 00 时 23 分和 03 时 08 分雷达西南 30 km 与正南夹角 60°左右的风为偏东风,而 850~700 hPa 的高度在 00 时测站风为偏东风,风向 70°,风速 3 m/s,两者风矢量是基本一致的。到 12 时雷达观测的风场东北风加强,雷达西南 30 km 与正南夹角 60°左右的风在 2 km 高度为东北风(见图 2(c))。到 23 日 00 时东北风占据雷达风常反演区域的主导位置,只在东南部 100 km 以外有风速较大的西南风(见图 2(d))。这与天气图实况在这一区域的形势是一致的。



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.

可见,反演的水平风场在总体形势上与天气图流场相对应的区域是一致的。

213 从反演的水平风场反算出径向速度分布与原始径向速度进行比较

从 VAP 方法反演的水平风场反算出来径向速度场,与原始的同高度径向速度场进行比较,是能够说明反演风正确性的最基本方法。图 3 给出宜昌 2002-07-22 03:25 的距地面 118 km (海拔 2 km) 的平面资料对比。

从分布上看,可以看到反算出来的径向速度场(图 3(b))与原始的径向速度场(图 3(a))的分布除了部分边缘区域外基本一致。边缘区域的差别主要是因为部分边缘区域由于资料缺测或区域太狭小没能反演出水平风场,也就不能再从反演的水平风场计算出径向速度场。由于水平风场反演前,对原始资料的滤波平滑,反算出来的径向速度场比原始径向速度场光滑。

从数值上看,从反演的水平风场计算出的径向速度场的数值比原始的同高度径向速度的数值偏小一些,在较大风速区偏小 2~3 m/s 左右。考虑到资料处理过程,认为这主要和进行水平风场反演前,对原始资料进行了滤波平滑有关。

214 与原始径向速度比较

一直以来将反演的风场与原始径向速度进行比较是多普勒雷达观测资料反演中常用的方法。因为在多普勒雷达观测的径向速度为零的位置,既是水平风径向速度分量为零,则水平风向应该与零线垂直。而在径向速度大值区,水平风向应该与该区域的径向方向近似平行。下面根据反演的风场的风向分布与原始径向速度的分布比较,尤其是在零线附近。

7 月 22 日 2 个时次的距地面 118 km (海拔 2 km) 的水平流场和原始径向速度回波的比较(图 4)可以看到在零线位置,水平风场的流线基本与零线垂直;而在径向速度大值区,流线方向与该区域的径向方向近似平行,这与理论上的分析是一致的。在正径向速度回波区流线的径向方向都是趋近雷达的,在负径向速度回波区流线的径向方向都是远离雷达的。因此从流线的方向和与零线位置的交角看,反演的风场的风向分布是正确的。

215 与双多普勒雷达反演的风场进行比较

通常认为双多普勒雷达反演的风场准确性较好。将 VAP 方法反演的风场与双多普勒雷达反演的风场进行比较。宜昌和荆州两站相距 90 km 左右。为了更清晰显示 VAP 方法反演风场特征,减少人为因素,VAP 方法反演风场中对资料缺测的区域没有进行差补。

单雷达反演的半径 125 km 的 07-22 03:25 分 2 km 高度的雷达回波强度和风矢量的叠加图(图 5)可以看到,A、B、C 3 个区域存在明显的风切变,相对应的位置则有回波强度的大值区与之对应。因此 A、B、C 3 个区域风切变的出现是正确的。大范围风场是连续的,与天气图中的风场形势(图 1(a))一致。图 5 方框中的区域为图 6 中 VAP 方法与双多普勒雷达反演的风场对比区域相对雷达扫描区域的位置。图 6 中用箭头标示出风场的主体走向。可以看到在共同的区域,风向和风速的分布基本一致。在这个区域内,风场从西南风向东风转向,在东南角西南风速较大,这两个特点在两图中是一致的。双多普勒雷达反演的风速比单多普勒雷达反演的风速值稍偏小,而且较光滑,这可能与两种方法处理资料时进行滤波光滑的程度有关。在径向速度资料区域边缘,单雷达反演的风场的风向出现较大的偏差,但这种范围相对整个反演的风场的区域来说只是很少的一部分,并不影响整体区域的分析。本个例其他几个时次的分析也得到基本相同的结论。

216 与单站测风比较

在雷达观测范围内存在宜昌测站(111118 E, 30142N, 海拔 01134 km), 在宜昌雷达所在地的西南 30 km, 与正南夹角 65左右。图 7 中蓝色圆圈定的区域是宜昌测站测风代表的大概区域。由于雷达一次扫描时间在 5 min 左右, 由于图中给出的是扫描起始时间, 因此选 22 日 23 时 57 分左右风场与 23 日 00 时探空比较。风向正北为 0b, 顺时针旋转为正。

表 2 给出 925、850 和 700 hPa 3 层测站风与雷达反演风的海拔高度、风向和风速对比分析。可以看到, 雷达风场大约测站位置的风速风向在各个高度上与测站风也是基本相同。风向误差大约在 1b 以内, 风速误差大约在 1~ 2 mPs , 与探空误差近似。

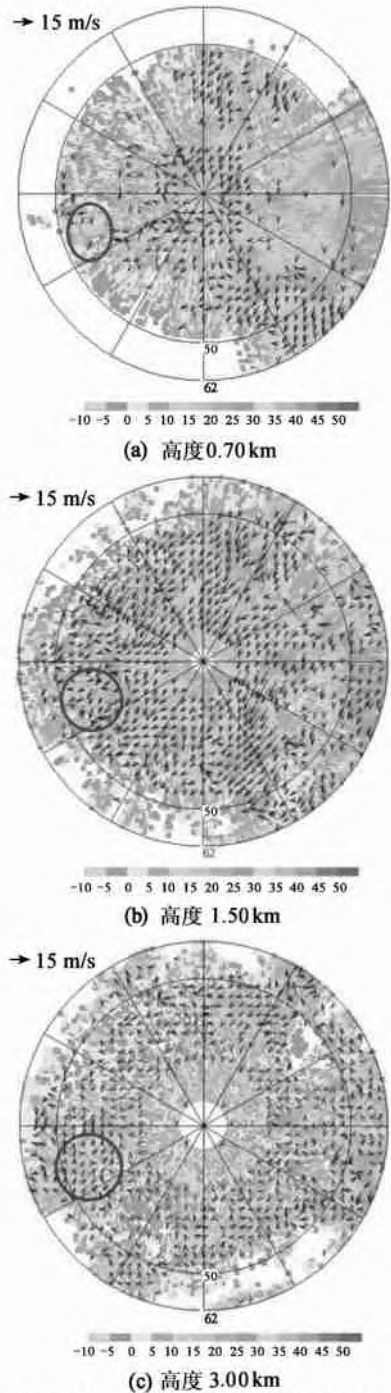
表 2 2002-07-23 00: 00 宜昌测站探空风与相应高度雷达反演风的风向风速对比

| Table 2 Observational wind and retrieved wind from Doppler radar data at YiChang station at 00 UTC 23 | | | | | | |
|---|--------|----------|-------------------------|------|-------|------|
| h/hPa | 风向P(b) | | 风速P(m#s ⁻¹) | | 海拔/km | |
| | 测站 | 雷达反演 | 测站 | 雷达反演 | 测站 | 雷达反演 |
| 925 | 0 | U 0 | 7 | 6~ 8 | 0170 | 0170 |
| 850 | 35 | 30~ 35 | 9 | 6~ 9 | 1143 | 1150 |
| 700 | 180 | 180~ 190 | 1 | 很小 | 3107 | 3100 |

3 2002-06-23) 24 降水过程风场反演的简要对比

为了进一步检验 VAP 方法反演的水平风场, 下面给出 2002-06-23) 24 合肥雷达观测的降水过程风场反演的简要对比。这次天气过程获得的雷达资料也是国家重点基础研究项目 2001) 2002 年长江中下游地区暴雨野外观测试验的观测结果, 合肥雷达与宜昌雷达型号相同。从合肥测站(117123bE, 31187bN) 和合肥雷达位置来看, 两者基本处在同一纬度, 但雷达较测站位置稍偏西约 30 m。在这次天气过程中, 合肥位于高空槽前, 西北与西南风交界处。

从风场形式看(图 8(a), (b)), 24 日 00 时合肥位于高空槽前, 西北与西南风交界处, 测站附近风场应该是从西北向西南风转变的区域。而从雷达反演的风场



雷达位置: 111. 30°E, 30. 703°N 雷达海拔: 0.20 km

图 7 2002-07-22 23: 57 不同高度水平风场与强度回波
Fig. 7 The horizontal wind field and reflectivity at 23: 57 UTC 22 July at different height

(图 8 (c), (d))也可以明显的看到这种风向的转变。而且可以看到伴随强回波区的明显的中 B 尺度的风场的切变和辐合(如图 8 (d)中实线标示)。

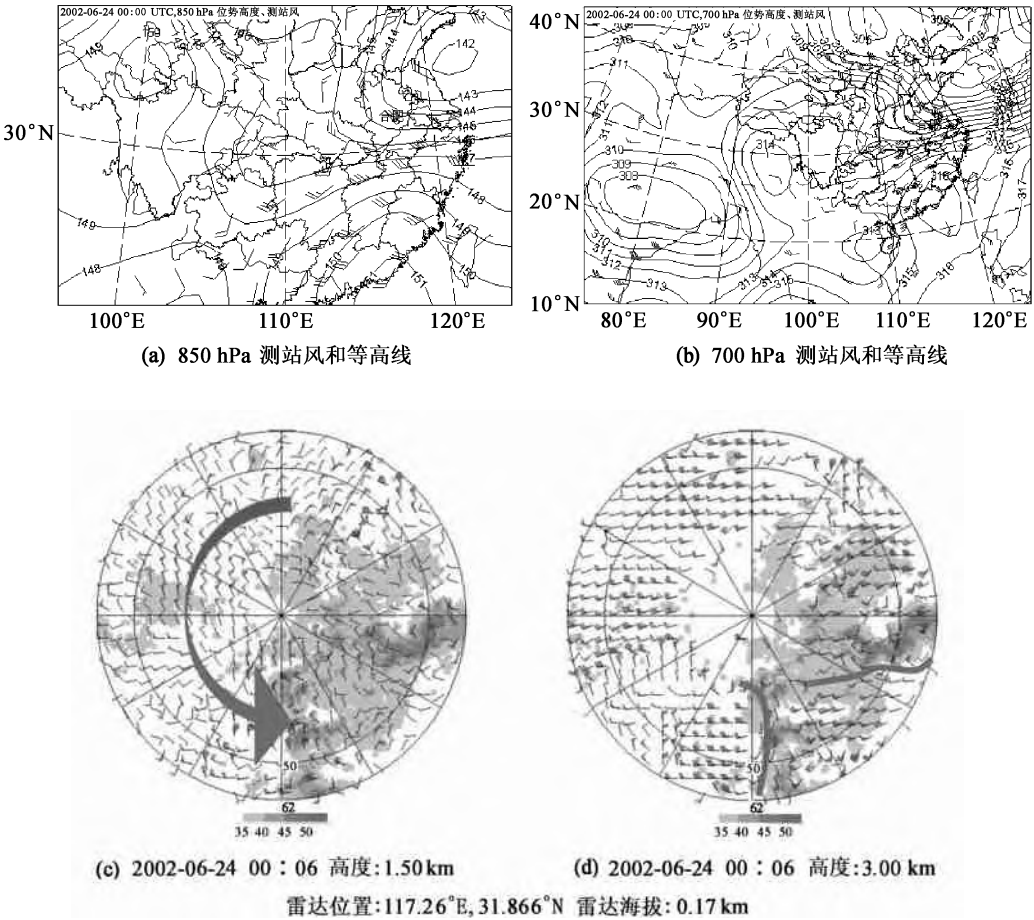


图 8 不同气压下测站风和等高线和 VAP 方法反演的水平风场

Fig. 8 Observational wind and isoline of Geopotential Height on different pressure and retrieved wind field using VAP method at different height

虽然没有合肥测站(117123E, 311876N)的探空资料,但根据 850 hPa 和 700 hPa 客观分析场估测的测站风与雷达反演风简单对比分析可以看到,雷达风场大约测站位置的风速在两个高度上与测站风也是基本相同。在 850 hPa 的测站风大约在 10 mPs,而雷达反演风在 6~ 8 mPs; 700 hPa 测站风大约在 16~ 20 mPs,而雷达反演风也在 16~ 20 mPs。

因此从本个例看再次说明反演的风场也是成功的,可以用于分析中尺度风场。

4 结 论

通过以上分析可以得到如下结论: (1) 在 125 km 的半径内, VAP 方法反演的水平风场的分辨率满足区分中 B 尺度系统要求。(2) 水平风场在总体形势上与客观分析流场相对应的区域是基本一致的。(3) 从 VAP 方法反演的水平风场反算出来径向速度场与原始径向速度场的分

布基本一致。由于反演风场过程中滤波处理, 反算出的径向速度场比原始数值略有偏小约 2~ 3 mPs 左右。(4) VAP 反演的风场与双多普勒雷达反演的风场的风向和风速的分布基本一致, 但单多普勒雷达反演可获得雷达整个扫描范围内的风场。5) 反演水平风场与测站风基本相同。风向误差在 10b 以内, 风速误差约 1~ 2 mPs, 与探空误差近似。总的来说 VAP 方法反演的水平风场可以正确地反映风场中的中-B 尺度结构, 可作为分析中尺度风场信息的依据。

参 考 文 献

- 1 Waldteufel P, Corbin H. On the Analysis of Single Doppler Data. J Appl Meteor, 1979, 18: 532-543
- 2 Person E O E, Andersson T. A Real Time System from Automatic Single Doppler Radar Analysis. SMHI OROMIS Reports, 1987
- 3 Sun Juan-Zhen, Dawn W Flicker, Douglas K Lilly. Recovery of Three-Dimensional Wind and Temperature Fields From Simulated Single Doppler Radar Data. J Atmos Sci, 1991, 48: 876-890
- 4 Qiu Chong-Jian, Xu Qin. A Simple Adjoint Method of Wind Analysis for Single Doppler Data. J Atmos and Oceanic Tech, 1992, 9: 588-598
- 5 Alan Shapiro, Paul Robinson. Single-Doppler Velocity Retrieval Experiments with a Simple 4DVAR Technique. 29th International Conference on Radar Meteorology, Canada: American Meteor Soc, 1999. 26-29
- 6 姜海燕, 葛润生. 一种新的单部多普勒雷达反演技术: [学位论文]. 北京: 中国气象科学研究院, 1995
- 7 陶祖钰. 从单 Doppler 速度场反演风矢量场的 VAP 方法. 气象学报, 1992, 50(1): 81-90

Tests for VAP Algorithm of Retrieving Wind from Single Doppler Radar Data

LIU Shuyuan¹⁾ LIU Liping²⁾ ZHENG Yongguang³⁾ TAO Zuyu³⁾

(¹⁾ Airforce Meteorological Center, Beijing, 100843; (²⁾ Chinese Academe of Meteorological Science, Beijing, 100081;

(³⁾ Department of Atmospheric science, School of Physics, Peking University, Beijing, 100871)

Abstract Tests were presented for detecting the reliability of meso-B scale (20~ 200 km) wind field retrieved from single Doppler radar by VAP(Velocity-Azimuth Process) algorithm using the data observed by dual Doppler radar. The analysis of the assumption of homogeneous regional wind showed that the resolution of wind field retrieved by VAP algorithm could meet the requirement of analyzing the mesoB scale weather system. The tests with different kinds of methods showed that the wind field retrieved by VAP algorithm could get the structure of meso-B scale wind field correctly, and could be used to analyze the meso-B scale wind field.

Key words Doppler radar; retrieved wind field; meso-B scale