

多普勒雷达资料对中尺度系统短期预报的改进^{*}

邱崇践 余金香

(兰州大学大气科学系, 兰州, 730000)

Qin Xu

(CIMMS/CAPS, 俄克拉何马大学, OK73019, 美国)

摘 要

文中给了一种由单多普勒雷达资料反演风矢量场的变分方法, 并由此形成预报初始场。运用美国风暴分析预报中心(CAPS)的改进的区域系统模式对移经美国俄克拉何马州的一个强雷暴系统进行了数值预报试验, 结果表明, 初始场中引入多普勒雷达观测资料后明显地改进了预报。

关键词: 多普勒雷达, 反演, 变分方法, 短期预报。

1 引 言

对诸如飑线、强对流这类中小尺度系统的数值预报和模拟, 一个很大的问题是缺乏足够的观测资料来作为初始场。多普勒雷达观测资料在时间和空间上均具有较高分辨率, 这对于生成中尺度模式的初始场应是有用的。但由于多普勒雷达能提供的仅仅是径向速度和回波强度两个要素的资料, 尚不足以构成预报所需的初始场。因此, 尽管多普勒雷达投入业务应已经十多年了, 将其观测资料用于形成数值预报初始场的研究才刚刚开始。近几年来, 已经发展了一系列技术试图由单多普勒雷达观测资料反演风矢量和温度场^[1~3], 这些方法为在数值预报初始场中使用多普勒雷达资料奠定了基础。Shapiro 等^[4]以反演风矢量场的方法为基础, 进行了利用多普勒雷达观测资料形成初始场的预报试验。经研究, 文中给出了一种由单多普勒雷达资料反演风矢量场的准四维变分分析方法, 然后利用 Gal- Chen^[5]提出的热力反演技术由风场产生初始气压场, 运用美国风暴分析预报中心(CAPS)的 ARPS 模式对 1995 年 5 月 7 日移经美国俄克拉何马州的一个强雷暴系统进行了数值预报试验。

2 反演风场的变分方法

邱崇践等^[2]提出的由单多普勒雷达资料反演风矢量场的简单伴随函数方法(Simple

* 初稿时间: 1997 年 12 月 30 日; 修改稿时间: 1998 年 5 月 25 日。

资助课题: 国家自然科学基金(49375241)。

adjoint method) 用于二维风场的反演有良好的效果, 但在用于三维问题时会遇到一些技术难题。主要是雷达资料通常都有许多缺测区, 给动量方程及其伴随方程的积分带来困难。此外, 雷达资料一般在球坐标网格上给出, 须插值到直角坐标网格。在远离雷达的地区, 相邻两个观测资料点的法向距离较大, 但径向速度不是一个标量, 插值间隔过大是不适宜的。缺测也给插值带来困难。

记待反演的直角坐标网格上的 3 个风分量为 u, v 和 w 。将问题表述为, 找到 u, v 和 w , 使如下定义的目标泛函 J 取极小值:

$$J(u, v, w) = \sum_{m=1}^M p_1 (R(u, v, w) - v_r^{\text{obs}})^2_m + \sum_{i,j,k} \{ p_2 B_{i,j,k}^2 + p_3 C_{i,j,k}^2 + p_4 E_{i,j,k}^2 + p_5 (\nabla_2 \cdot V)_{i,j,k}^2 + p_6 \zeta_{i,j,k}^2 + p_7 S_{i,j,k}^2 \} \quad (1)$$

式中下标 m 表示雷达测点编号, 下标 i, j, k 分别表示 x, y 和 z 方向直角坐标网格点的编号。 v_r^{obs} 是径向速度的观测值, R 是由反演出的风场 u, v 和 w 计算雷达测点的径向速度 v_r 的算子, 可记为 $v_r = R(u, v, w)$, 它由两个过程组成: (1) 由直角坐标网格点上的 u, v 和 w 用线性内插计算该网格体包含的测点 m 处的 u_m, v_m 和 w_m , 具体算法是找到第 m 个雷达测点所处的网格体, 利用该网格体的 8 个格点的 u, v 和 w 作线性内插; (2) 由 u_m, v_m 和 w_m 合成 v_r 。显然, 目标泛函第一部分的含义是要求由反演出的风矢量场插值计算的径向速度与观测尽量接近, 这一插值是由直角坐标网格点向球坐标网格作内插, 避开了将观测资料由球坐标网格向直角坐标网格的插值分析过程及由此产生的问题。但计算网格较小时, 许多网格体内没有观测值, 分析的结果有不连续现象。为解决这一问题, 先用粗网格(格距扩大 2 倍)作分析, 然后再缩小格距。这时, 第一次的分析场作为新的背景场。

$$B^2 = (u - u_b)^2 + (v - v_b)^2 + \mu(w - w_b)^2 \quad (2)$$

表示分析场和预先给出的背景场(下标为 b 的量)的距离, μ 是个权重系数(取 $\mu = 10.0$), 背景场的产生方法将在下一部分叙述。

$$C = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} - qw$$

是质量守恒方程, 其中 $q = -\partial \ln p / \partial z$, 对标准大气 $q = 10^{-4} \text{ m}^{-1}$

$$E = \left(\frac{\partial v_r}{\partial x} \right)^{\text{obs}} + \frac{\partial w_r}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial y} + \frac{\partial w_r}{\partial z} - \frac{v_r^2 + w_r^2}{r}$$

是径向分量的动量守恒方程, 其中时间倾向项是由相邻两次时间的观测计算的, 其它项均由分析值计算。在方程中运用了三维无辐散的假设, 并略去了源项。

$$\nabla_2 \cdot V = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

分别是水平散度和涡度的垂直分量, S 是对 u, v 和 w 的三维平滑量, 其定义如下:

$$S^2 = S_u^2 + S_v^2 + S_w^2$$

$S_u^2 = (u_{i+1,j,k} + u_{i-1,j,k} + u_{i,j+1,k} + u_{i,j-1,k} + u_{i+1,j,k+1} + u_{i,j,k+1} + u_{i,j,k-1} + u_{i,j,k-1} - 6u_{i,j,k})^2$
 S_v^2 和 S_w^2 有类似的公式。

在目标函数中加入后三项约束是为了减轻观测误差对分析结果的影响。 p_n ($n = 1 \sim 7$) 是权重系数, 按各项的方差估计值的倒数给出。

不难由上面各式求出 J 相对于各网格点的 u, v 和 w 的梯度, 然后利用这些梯度值用极小化算法(采用一种有限记忆的BFGS算法^[6])即可找出极小值点。

根据反演的三维风场及其时间倾向(用反演的两个时刻的三维风场差分计算), 利用 Gal-Chen^[5] 提出的热力反演技术计算气压扰动场的方法, 可得到预报所需初始场的基本要素。

3 模式及资料

预报试验采用美国风暴分析预报中心(CAPS)的ARPS模式^[7], 水平网格为 102×102 , 格距为 3 km, 垂直 34 层。预报对象是 1995 年 5 月 7 日移经美国俄克拉何马州的一次强雷暴系统。初始时刻为 5 月 7 日 1800(UTC), 观测资料由位于 Twin Lakes 的一部 WSR-88D 雷达提供, 扫描范围: 方位角 $0 \sim 360^\circ$ (间隔约 1°), 仰角 $0.5 \sim 19.7^\circ$ (不等距 9 层), 径向库距 1 km, 大约 6 min 完成一次扫描。在进行风场反演前, 对雷达观测资料作了适当的平滑处理消除噪音, 平滑方式是径向取 5 点平滑后再在横向作 3 点平滑。本工作中使用的背景场由 ARPS 分析系统(ADAS)^[7] 提供, 分析中使用了常规探空观测资料和俄克拉何马州中尺度观测网提供的地面观测资料。侧边界条件由 9 km 的粗网格模式预报提供(未用雷达资料)。

4 预报结果

图 1 和图 2 分别是预报初始时刻(1800UTC)和 2 h 后(2000UTC) 1.5° 仰角上观测的雷达反射率因子, 可以看到, 一个南北向的强雷暴系统向东移往俄克拉何马州东部, 反射率峰值为 54 dBZ(1800UTC)和 58 dBZ(2000UTC)。由 ADAS 分析提供的初始风场和

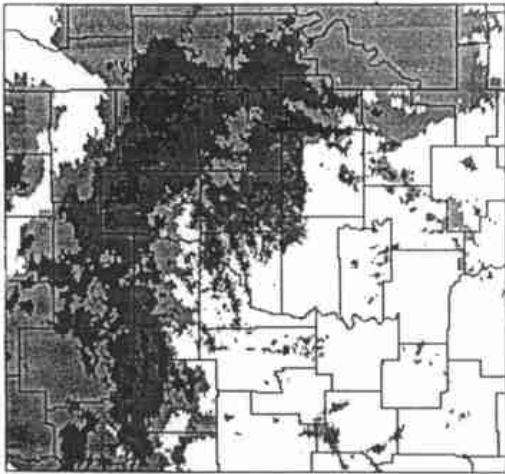


图 1 初始时刻(1800UTC) 1.5° 仰角上观测的
雷达反射率因子

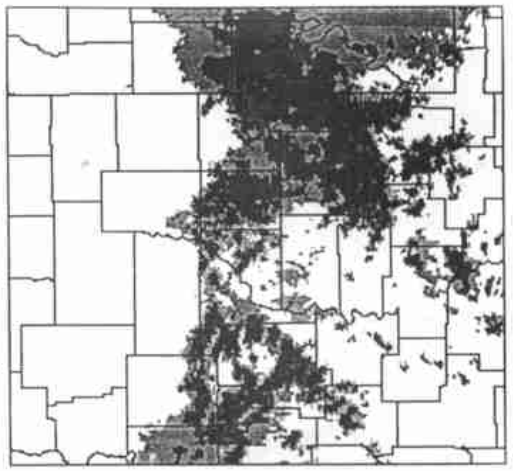


图 2 2 h 后(2000UTC) 1.5° 仰角上观测的
雷达反射率因子

温度场(图 3)都比较均匀, 反映不出初始时刻雷暴系统的存在。但使用雷达资料后形成的初始场在雷暴系统附近有明显的辐合气流和温度梯度(图 4)。图 5 是未使用雷达资料时

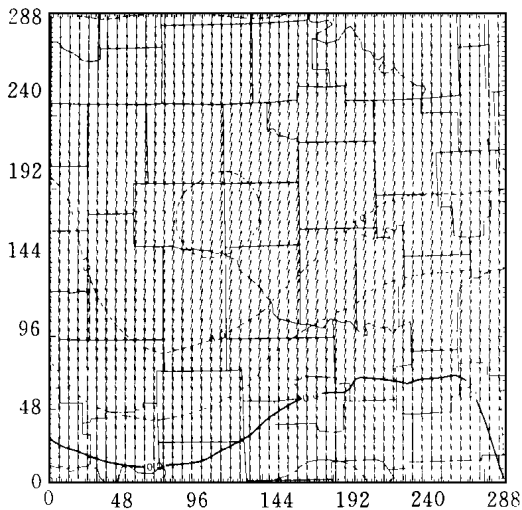


图 3 未使用雷达资料时的初始水平风场和温度扰动场

($z = 2000 \text{ m}$, $T_{\max} = 0.564$, $T_{\min} = -1.57$,
 $U_{\max} = 5.99 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $U_{\min} = -0.38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
 $V_{\min} = 19.49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $V_{\max} = 25.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

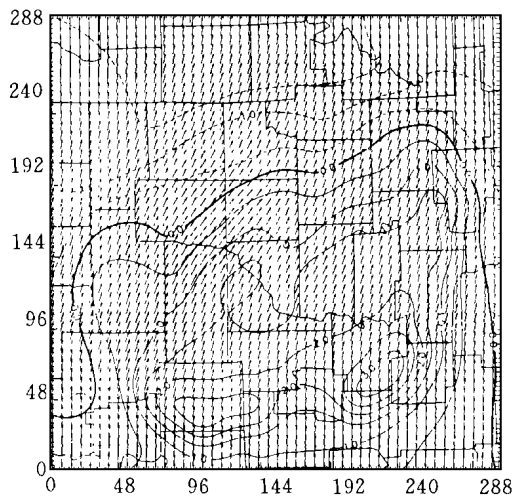


图 4 使用雷达资料时的初始水平风场和温度扰动场

($z = 2000 \text{ m}$, $T_{\max} = 3.35$, $T_{\min} = -1.98$,
 $U_{\max} = 15.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $U_{\min} = -0.34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
 $V_{\max} = 27.66 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $V_{\min} = 15.93 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

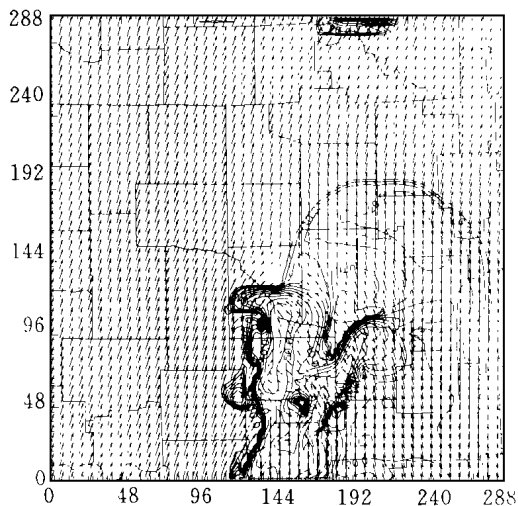


图 5 未使用雷达资料时 2 h 预报的雷达反射率因子

($z = 2000 \text{ m}$, $T_{\max} = 61.5^\circ$, $T_{\min} = 0$,
 $U_{\max} = 20.23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $U_{\min} = -22.38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
 $V_{\max} = 48.51 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $V_{\min} = -3.13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

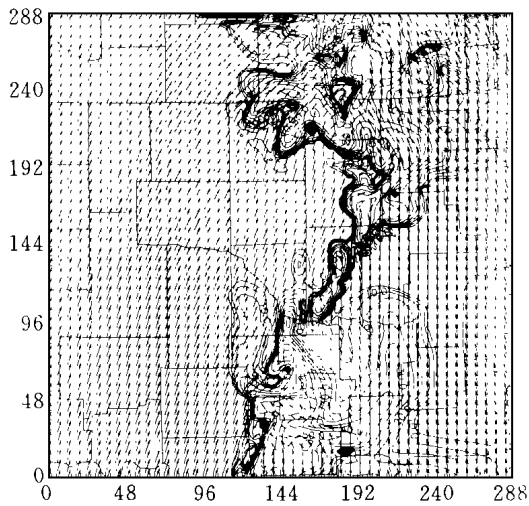


图 6 使用雷达资料时 2 h 预报的雷达反射率因子

($z = 2000 \text{ m}$, $T_{\max} = 59.0^\circ$, $T_{\min} = 0$,
 $U_{\max} = 23.40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $U_{\min} = -25.55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
 $V_{\max} = 51.69 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $V_{\min} = -4.61 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

2000 m 高度上雷达反射率因子的 2 h 预报值, 反射率因子 Z (dBz) 是根据下面的经验公式^[8]计算的:

$$Z = 10.0 \times \log[\max(A, 1)]$$

对液态水, $A = 1.73 \times 10^4 (\rho q_r)^{7/4}$;

有固态水时, $A = 1.73 \times 10^4 (\rho q_r)^{7/4} + 3.8 \times 10^4 (\rho q_h)^{2.2}$ 。

式中 ρ 是空气密度, q_r 和 q_h 分别是雨水混合比和固体水混合比。

未使用雷达资料时, 北部的雷暴系统未能预报出来。使用雷达资料后所作的预报(见图 6)则有明显改进, 预报区的东北部有一强降水区(反射率因子峰值为 59 dBz), 低层伴有明显的辐合气流, 降水区范围和位置与观测很接近。在其它高度上(1000 ~ 10000 m), 两次预报的反射率因子的图形与上述情况很相似, 不再一一叙述。

试验表明, 初始场中利用多普勒雷达观测资料有可能提高对中小尺度系统的短期预报水平, 在这方面作进一步的研究是有价值的。

致谢: 对美国俄克拉何马大学的 Limin Zhao 女士, Alan Shapiro 博士, Ming Xue 博士和 Jidong Gao 博士给予的大力帮助, 研究中使用的 CAPS 的 ARPS 系统软件并得到美国国家自然科学基金资助(ATM-9417304 at CIMMS/CAPS, University of Oklahoma), 作者在此一并表示感谢。

参考文献

- 1 Sun J, Flicher D, Lilly D. Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from single-Doppler radar data. *J Atmos Sci*, 1991, 48: 876- 890
- 2 Qiu C, Xu Q. A simple adjoint method of wind analysis for single-Doppler radar data. *J Atmos Oceanic Tech*, 1992, 9: 588- 598
- 3 Shapiro A, Ellis S, Shaw J. Single-Doppler velocity retrievals with Phoenix data: Clear air and microburst wind retrievals in the planetary boundary layer. *J Atmos Sci*, 1995, 52: 1265- 1287
- 4 Shapiro A, et al. Initial forecast fields created from single-Doppler wind retrieval, thermodynamic retrieval and ADAS. Preprint, 11th Conf on NWP American Meteorological Society, 1996. 5A. 7
- 5 Gal- Chen T. A method for the initialization of the anelastic equations: Implications for matching models with observations. *Mon Wea Rev*, 1978, 106: 587- 606
- 6 Liu D, Nocedal J. On the limited memory BFGS method for large scale optimization. Tech Rep NAM03, Dept Of Electrical Engineering and Computer Science, Northwestern University, US. 1988. 26pp
- 7 Xue M, Drogemeier K, Wong V, et al. ARPS Version 4.0 User's Guide. Sept. 1995, CAPS, The University of Oklahoma. 380pp
- 8 Kessler E. On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation. *Meteor Monogr*, Amer Meteor Soc, 1969, 10: 165- 170

USE OF DOPPLER-RADAR DATA IN IMPROVING SHORT-TERM PREDICTION OF MESOSCALE WEATHER

Qiu Chongjian Yu Jinxiang

(Department of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Qin Xu

(CIMMS/CAPS, University of Oklahoma, 100 E. Boyd, Norman, OK 73019, USA)

Abstract

A variational method for retrieving wind vector from single-Doppler wind measurements is developed and the initial forecast fields are created from the retrieved winds. A numerical experiments to forecast a squall-line storm system passing through the Oklahoma State is performed by using the Advanced Regional Prediction System (ARPS) developed by the Center for Analysis and Prediction of Storms (CAPS) at the University of Oklahoma in the United States. The experiment shows: the Doppler radar data can be used to improve the analysis of the initial fields and short-term numerical prediction of mesoscale weather.

Key words: Doppler-radar, Retrieval, Variational method, Short-term prediction.