

单部多普勒天气雷达对降水中垂直 流场结构的探测研究*

彭 红 葛润生

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

提 要

该文提出用单部多普勒天气雷达距离高度扫描(RHI)的探测资料,从大气运动连续方程出发,在实际流场的二维假设下,反演雷达探测区域内的垂直剖面流场结构.通过个例试验表明,反演结果比较合理.该方法可供多普勒天气雷达探测研究应用.

关键词:单部多普勒雷达;垂直流场;反演.

引 言

多普勒天气雷达在得到降水中回波强度分布的同时,还能获得多普勒速度和谱宽的分布,为进一步认识和研究降水云体的动力结构提供了观测依据.但多普勒速度是降水水质点沿雷达波束方向的分量,即径向速度,实际三维风场的分布通常要依赖两部以上的多普勒天气雷达联合探测得到^[1].两部以上的多普勒天气雷达联合探测较难组织,资料处理也很复杂,难于在气象业务工作中使用,运用单部多普勒天气雷达资料反演风场结构成为迫切需要解决的课题.

单部多普勒天气雷达反演风场技术始于 60 年代末,开始着重于运用单部多普勒天气雷达资料来反演大范围降水云体中的垂直风廓线,称为 VAD 技术^[2].对这种技术国内也进行了较多研究^[3,4],并且形成了软件供研究和业务使用.80 年代中期开始运用单部多普勒天气雷达资料反演二维水平风场甚至三维风场的研究,取得了一些令人鼓舞的试验结果^[5-7],但完善其方法仍有相当多的工作需要做.

众所周知,大气中的垂直运动对降水的发展起着非常重要的作用.降水云体中垂直流场结构是研究人员所关心的问题. Battan^[8]最早使用垂直指向多普勒天气雷达,用时空转换方法获取风暴内二维垂直流场结构.采用两部或多部多普勒天气雷达联合探测来获取雨带的垂直风场结构也有不少成功的事例^[9,10].藤田(个人交流)曾用单部多普勒天气雷达的 RHI 资料获取低空垂直气流结构,反演中主要用径向速度资料,对于强降水,雨滴下

* 本文由国家自然科学基金资助项目 49375232 资助.

1994-04-28 收到,1994-11-02 收到修改稿.

降速度会造成很大误差. 本文采取综合应用强度、径向速度资料和连续方程来反演风暴垂直剖面上的流场结构.

1 反演方法

多普勒天气雷达的距离高度扫描方式(RHI)是雷达天线以一固定的方位角做垂直剖面的扫描(图 1),从而得到扫描剖面上对应各个径向距离 r 和仰角 θ 的回波强度 Z , 径向速度 V_D 和谱宽 W . 通过改变方位角,雷达可探测不同方位的垂直剖面上强度和径向速度分布. 雷达探测并不能直接得到速度在水平方向和垂直方向的分量.

许多研究结果表明^[11,12],象胞线、气旋内的中尺度雨带等系统具有准二维的流场结构,其风场沿平行于胞线或雨带方向的切变远小于垂直于胞线或雨带方向的切变. 在京津冀地区夏季的观测中,也常观测到呈东北—西南走向或东—西走向的中尺度雨带和胞线,对其的分析和模拟研究结果,也表明其风场具有准二维结构^[13,14],沿雨带方向的辐合辐散作用相对其它两方向较小. 本文在对多普勒雷达资料的反演过程中对这类降水系统进行了局地二维假设,由单部多普勒雷达的 RHI 资料,利用连续方程反演降水云体的垂直剖面流场.

在球坐标系中,设 r 为径向距离, θ 为仰角, ψ 为方位角,对应的速度分量为 $V = (v_r, v_\theta, v_\psi)$, ρ 代表大气密度. 则大气运动连续方程可表示为:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r^2 v_r) + \frac{1}{r \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho \cos \theta v_\theta) + \frac{1}{r \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \psi} (\rho v_\psi) = 0 \quad (1)$$

上式是滞弹性假设下的连续方程形式,能适用于中小尺度天气过程的描述.

在方位角为 ψ 的邻近区域中,当 ψ 方向的速度梯度远小于 r, θ 两方向的速度梯度时,方程(1)中可略去左边第三项,从而简化为二维形式:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r^2 v_r) + \frac{1}{r \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho \cos \theta v_\theta) = 0 \quad (2)$$

式(2)中只包含径向速度分量 v_r 和切向速度分量 v_θ . 由多普勒雷达实际观测确定了 v_r ,由式(2)可求出 v_θ :

$$v_\theta = v_\theta|_{\theta=0} - \frac{1}{\rho \cos \theta} \int_0^\theta \left[\frac{\cos \theta}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r^2 v_r) \right] d\theta \quad (3)$$

在给定了边条件和密度公式并求出 v_θ 后,可进一步由 v_r, v_θ 合成对应方位角为 ψ 的垂直剖面流场分布.

在对式(3)积分时,本文假设地面的垂直速度为 0,这一假设在雨区距雷达较近时是合理的. 此时边条件:

$$v_\theta|_{\theta=0} = 0 \quad (4)$$

任意高度的密度订正公式采用^[15]:

$$\rho = \rho_0 \exp(-gMr \sin \theta / RT) \quad (5)$$

式中 ρ_0 为地面大气密度, g 为重力加速度, M 为干空气平均摩尔质量, R 为气体常数, T 为大气温度,由探空曲线得到, r 为距离, θ 为仰角.

多普勒天气雷达探测到的径向速度除了大气运动的径向分量,还包含降水质点的重力下降速度在径向上的投影(图1). 设雷达实测的多普勒径向速度为 V_D ,降水质点的下降末速度为 w_i ,则大气运动的径向分量 v_r 为:

$$v_r = V_D - w_i \sin \theta \quad (6)$$

雨滴下降末速度的计算公式采用 Atlas 等人由实验数据得出的经验公式^[15]:

$$w_i = 2.65Z^{0.114}(\rho_o/\rho)^{0.4} \quad (7)$$

式中 Z 为雷达反射率因子(mm^6/m^3),密度 ρ 由式(5)计算.

综上所述,在方位角为 ψ 的垂直剖面上,由多普勒径向速度 V_D 求切向速度 V_θ 的公式可以总结如下:

$$\begin{cases} v_\theta = -\frac{1}{\rho \cos \theta} \int_0^\theta \left[\frac{\cos \theta}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r^2 v_r) \right] d\theta \\ v_r = V_D - w_i \sin \theta \\ w_i = 2.65Z^{0.114}(\rho_o/\rho)^{0.4} \\ \rho = \rho_o \exp(-gMr \sin \theta / RT) \\ v_\theta|_{\theta=0} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

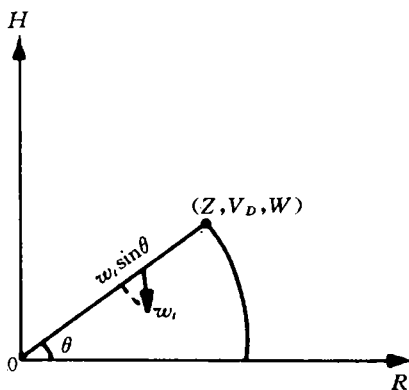


图1 多普勒天气雷达 RHI 扫描及降水质点下降速度在径向上投影的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Doppler radar RHI scanning and the projection of the raindrop fall velocity in the radial direction

2 资料处理

本文的资料选自中国气象科学研究院中尺度所的 10 cm 多普勒天气雷达. 采样分辨率为:仰角间隔 0.1° ,每条径向上每隔 300 m 得到一组数据(回波强度、径向速度、谱宽). 仰角扫描范围为 $0^\circ \sim 30^\circ$,径向最大距离为 300 km. 本探测系统的其它参数指标参见文献^[16].

在利用雷达探测资料反演降水云体的垂直剖面流场之前,首先要对雷达原始资料进行预处理,主要包括:(1)去除雷达多普勒速度场的非气象杂波. 本文利用回波强度场来排除径向速度场中的杂波;(2)对雷达原始资料中的缺测数据进行判别和补充;(3)对雷达原始资料进行光滑滤波处理;(4)判断并消除多普勒速度场的速度模糊区域;(5)对雷达原始资料进行加权平均至所需要的网格点上.

经过以上步骤后,再按照反演方法求解切向速度场,最后合成输出垂直剖面流场(图2).

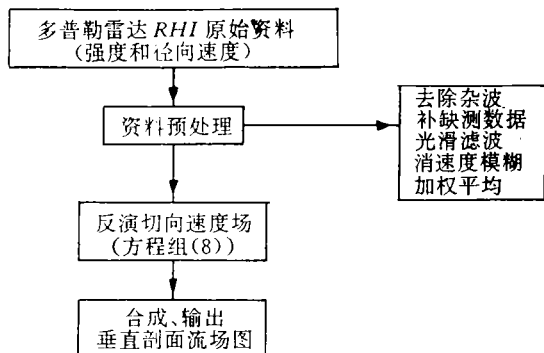


图2 由多普勒雷达资料反演垂直流场流程图
Fig. 2 Flow diagram for retrieving vertical section of wind field from Doppler radar observations

3 个例试验

利用以上介绍的反演方法,本文对 1993 年 7 月 5 日的雷达资料做了个例试验.

(1) 天气背景及回波特征 1993 年 7 月 4 日至 7 月 9 日,在北京、天津、河北地区,由于受西风槽东移和高空冷涡的共同影响,出现了大到暴雨,局地出现大暴雨.在多普勒雷达的低仰角水平扫描图上,强度回波表现为呈东西走向逐渐向东南偏移的雨带(图 3),强回波中心达到 45dBZ 以上.

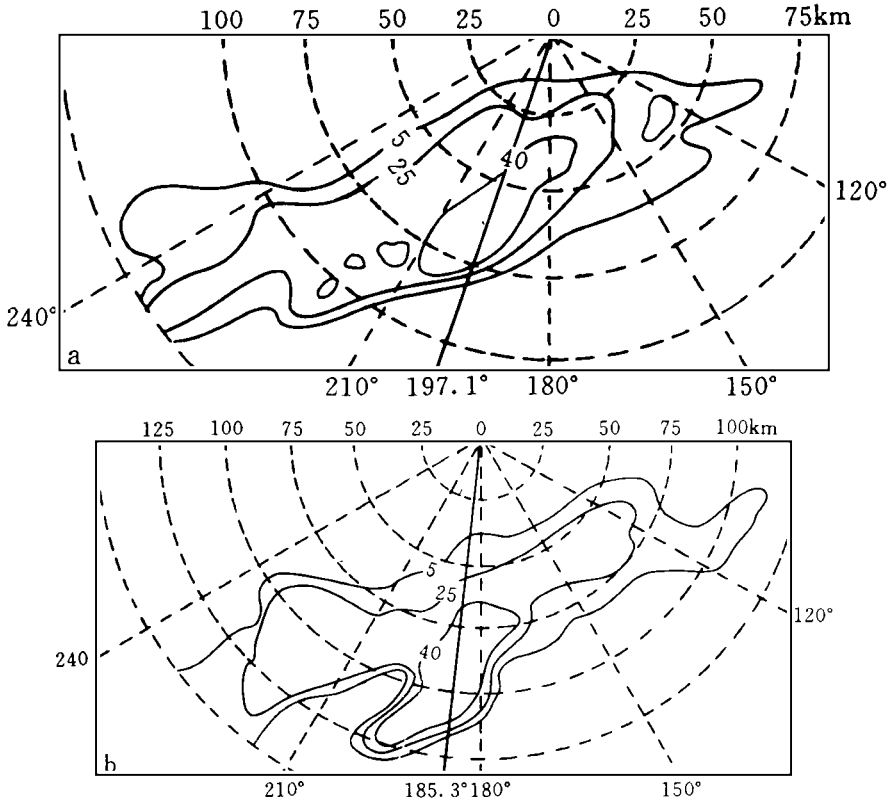


图 3 1993 年 7 月 5 日雷达 PPI 强度回波等值线 (a)7 月 5 日 21:09 (b)7 月 5 日 21:57(单位:dBZ)(扫描仰角为 1.5°)

Fig. 3 Isogram of Doppler radar PPI intensity echoes on July 5, 1993. (elevation angle is 1.5°) (a)21:09 (b)21:57

(2) 反演结果 图 4(a) 是 1993 年 7 月 5 日 21:03 沿 197.1° 方位作的雷达距离高度扫描(RHI) 以及由 RHI 资料反演的垂直剖面流场. 从图中可以看到, 7 月 5 日 21 时, 产生回波的雨带正处于对流比较旺盛时期, 大于 35 dBZ 的回波区水平范围近 40 km, 高度达到 7 km. 整个回波顶高达到 14 km, 内部还有两个强回波中心. 与回波强度相对应, 反演的剖面流场也表现出有组织的对流结构. 在回波区前方, 低空是比较强的入流区, 与两个强回波中心相对应, 有两支明显的上升气流, 中间夹着较弱的补偿下沉气流. 在回波区后部, 主要是辐散下沉气流.

图4(b)是1993年7月5日22:07在185.3°方位所做的雷达剖面扫描和反演的垂直流场.这时强回波中心的范围明显减小,并已向南偏移(参见图3),在回波区后部形成大片层状云降水.与回波结构相对应,在回波区前方,仍有一支明显的入流及上升气流(强度明显减弱),而在回波区后部形成较大范围的下沉辐散气流,同时混杂着弱的上升气流.

由图4还可以看到,由径向风场反演出的垂直剖面上流场的结构,与雷达回波强度场的分布有很好的配置,能较好地解释回波强度的垂直分布结构,表明这种反演技术可以帮

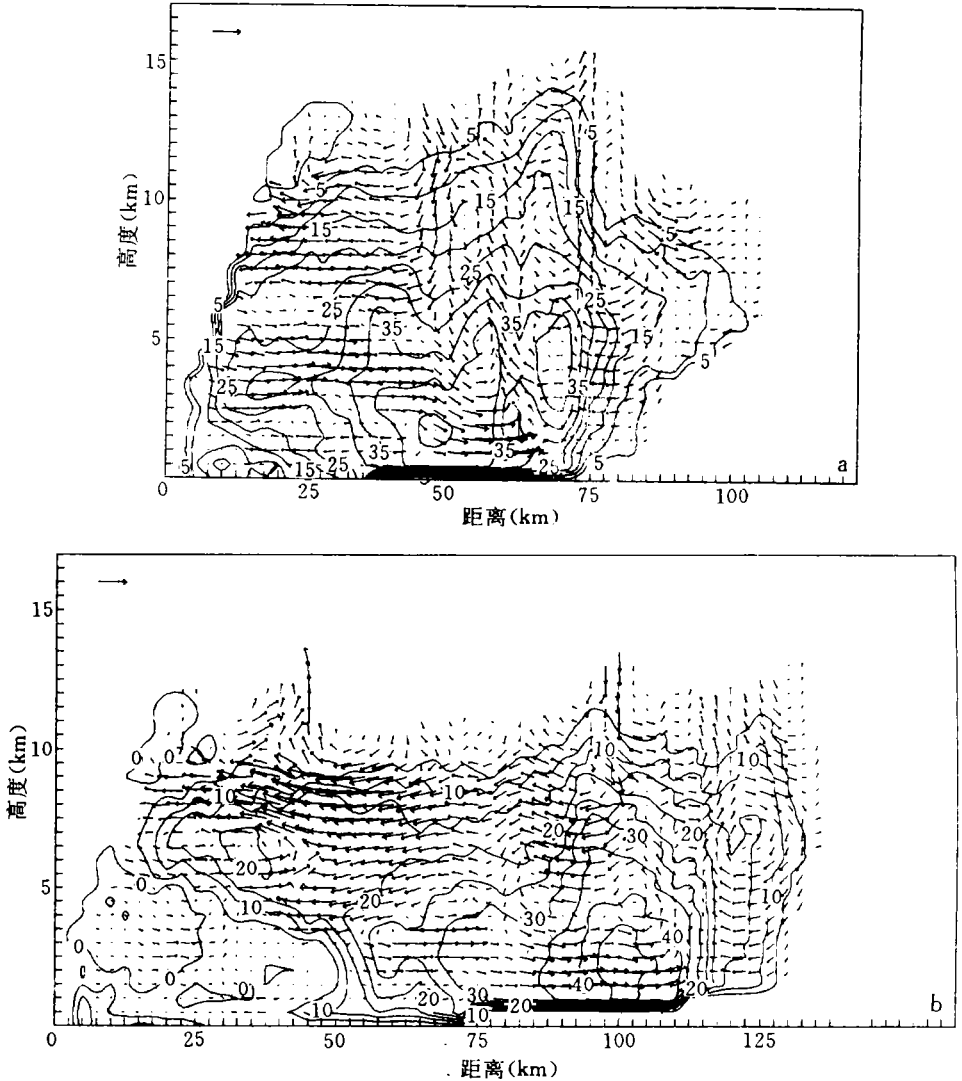


图4 垂直剖面流场及回波强度等值线迭加图

(a)1993年7月5日21:03(方位角197.1°) (b)1993年7月5日22:07(方位角185.3°)

Fig. 4 Vertical section of wind field superimposed by the isogram of echo intensity on July 5, 1993 (a) 21:03 (azimuth angle is 197.1°) (b) 22:07 (azimuth angle is 185.3°)

助我们了解降水区中垂直气流的结构。

4 结 语

本文介绍了用单部多普勒天气雷达的距离高度扫描资料反演降水云体内垂直剖面流场的方法,并对 1993 年 7 月 5 日的雷达资料进行了个例试验。结果表明,该方法反演出的垂直流场与降水回波演变过程相吻合,揭示了降水云体内垂直流场的细致结构。在下一步的工作中,要通过更多的个例试验,研究本方法对不同天气系统的适用范围。

致谢:在本文成文过程中,与张沛源、王丽波、姜海燕等同志进行了有益的讨论,一并致谢。

参 考 文 献

- 1 Armijo L. A theory for the determination of wind and precipitation velocities with Doppler radars. *J. Atmos. Sci.*, 1969, **25**: 570~573.
- 2 Browning K A and Wexler R. The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar. *J. Appl. Meteor.*, 1968, **7**: 105~113.
- 3 何平,葛润生.多普勒天气雷达 VAD 技术精度的研究.中尺度气象文集.北京:气象出版社,1993.8~11.
- 4 Tao Z Y. Dealiasing of velocity ambiguity and extension of VAD technique for Doppler radar observations. 3rd PRC/USA Workshop on Mesoscale Meteorology. 1992. 21~23.
- 5 宋春梅,葛润生,张沛源.单部多普勒天气雷达对二维水平风场的探测研究.中尺度气象文集.北京:气象出版社,1993.1~7.
- 6 Qiu C and Q Xu. A simple adjoint method of wind analysis for single-Doppler data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1992, **9**: 588~598.
- 7 Sun J, Flicker D W and Lilly D K. Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from simulated single-Doppler radar data. *J. Atmos. Sci.*, 1991, **48**: 876~890.
- 8 Battan L J. Radar Observation of the Atmosphere. Chicago: The University of Chicago Press, 1973. 129~139.
- 9 Ray P S, Zieyler C L, Bumgarner W and Serafin R. Single-and multiple-Doppler radar. *Mon. Wea. Rev.*, 1980, **108**: 1607~1625.
- 10 Testud J. Three-dimensional wind field analysis from Doppler radar data. In: Mesoscale Meteorology Theories, Observations and Models. by D. Reidel Publishing Company, 1983. 711~753.
- 11 Browning K A and Hardman M E. The structure of rainbands within a mid-latitude depression. *Quarterly J. Royal Meteor. Soc.*, 1973, **99**(420): 215~231.
- 12 Rotunno R and Klemp J B. A theory for strong, long-lived squall lines. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**: 463~485.
- 13 刘玉宝.三维弹性套网格中尺度($\beta-\gamma$)大气模式.北京大学博士论文.1992.
- 14 施建华.一次京津冀飑线过程的中尺度分析和数值模拟研究,中国气象科学研究院硕士论文,1993.
- 15 Doviak R J and Zrnic D S. Doppler radar and weather observations. Academic Press, INC. 1984. 250~251.
- 16 葛润生,王顺生,张沛源. CAMS 多普勒天气雷达系统.气象科学技术报告第 88009 号.中国气象科学研究院. 1988.

ESTIMATION OF VERTICAL WIND FIELD IN PRECIPITATION FROM SINGLE DOPPLER RADAR

Peng Hong Ge Runsheng

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

A method for estimating the vertical wind field from single Doppler radar Range-Height Indicator (RHI) is developed. By using the atmospheric continuous equation and the two-dimensional supposition to real wind, the wind components perpendicular to the axis of the radar beam within the radar vertical scanning plane are calculated. Several experiments show that the method is able to retrieve the vertical section of wind structure in the rain band reasonably, and it can be further applied to the study of Doppler weather radar observations.

Key words: Single Doppler radar; Vertical wind field; Retrieval.