

一种新的单部多普勒雷达反演技术*

姜海燕 葛润生

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

提 要

基于一些发展较强的中小尺度天气系统往往与风场的旋转或辐合、辐散有关的事实, 文章提出了一种单部多普勒天气雷达径向风场反演二维水平风场的新方法, 即涡度-散度方法. 文中对1994年7月12日的个例进行了反演处理, 处理结果与天气实况进行了对比分析, 认为该方法不失为一种具有实用价值的单部多普勒雷达反演水平二维风场的方法.

关键词: 单部多普勒雷达 水平风场 反演

引 言

目前的各种探测手段中, 唯有利用多普勒天气雷达, 才能较好地获得云体内部风场分布和结构的信息. 但是, 单部多普勒雷达只能观测到风场的径向分量, 无法直接获得风场的二维结构. 这样, 如何从径向风得出实际风就成了多普勒天气雷达开发应用中的主要研究课题之一. 60年代人们提出的VAD方法^[1~3]可以在均匀风场的假定条件下, 由径向速度反演出平均风向和风速以及风场的平均散度、伸长形变和切变形变, 获得垂直廓线分布. 70年代, 在局地均匀风场的假定条件下, 相继提出了速度面积显示(VARD)和速度体积处理(VVP)技术^[4, 5], 希望能获得二维风场的分布. 宋春梅^[6]、陶祖钰^[7]等分别以UW方法为基础提出了速度方位处理方法(VAP方法), 在假定流场局地均匀的条件下, 运用几何学的方法, 求取二维风场的分布. VARD、VVP方法计算比较复杂, 难于实际应用; VAP方法则假设条件过强, 仅适合较均匀风场的反演. 本文从中尺度涡度方程出发, 在某些假设条件下, 导出一种新的反演二维风场的技术, 称为涡度-散度方法.

1 涡度-散度方法的原理

在雷达探测的极坐标(以雷达为原点, r 为到雷达的距离, θ 为方位角)中, 气象上通常考虑的垂直涡度 ζ 及水平散度 D 可表示为:

* 本文由国家自然科学基金项目 49375232 资助.
1995-09-26 收到, 1996-05-15 收到修改稿.

$$\xi = \frac{V_u}{r} + \frac{\partial V_u}{\partial r} - \frac{\partial V_r}{r\partial\theta} \quad (1)$$

$$D = \frac{V_r}{r} + \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial V_u}{r\partial\theta} \quad (2)$$

其中 V_r 为径向风速, V_u 为切向风速.

中尺度涡度方程经尺度分析和适当简化后可表示为^[8]:

$$\left[\frac{\partial \xi}{\partial t} + u \frac{\partial \xi}{\partial x} + v \frac{\partial \xi}{\partial y} \right] + (f + \xi)D - \left(\frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

式中各量均为直角坐标中中尺度场的物理量. u 、 v 、 w 是风场的 3 个分量, f 是地转涡度的垂直分量, 在雷达探测范围内可视为常数. 对方程(3), 进一步作出如下两项假定:

(a) $\frac{\partial \xi}{\partial t} = 0$, 即涡度的局地变化很小, 可略去.

(b) $\left(\frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial z} \right) = 0$

此项是扭转项. 在二维情况下, 假定垂直速度 w 在小区域内均匀, 则有 $\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0$, 则扭转项可忽略. 方程(3)可简化为:

$$u \frac{\partial \xi}{\partial x} + v \frac{\partial \xi}{\partial y} = - (f + \xi)D \quad (4)$$

在雷达极坐标中, 式(4)可转化为:

$$V_r \frac{\partial \xi}{\partial r} + V_u \frac{\partial \xi}{r\partial\theta} = - (f + \xi)D \quad (5)$$

将方程(1)、(2)和(5)联立, 即得涡度-散度方法的反演方程组:

$$\begin{cases} \xi = \frac{V_u}{r} + \frac{\partial V_u}{\partial r} - \frac{\partial V_r}{r\partial\theta} \\ D = \frac{V_r}{r} + \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial V_u}{r\partial\theta} \\ V_r \frac{\partial \xi}{\partial r} + V_u \frac{\partial \xi}{r\partial\theta} = - (f + \xi)D \end{cases} \quad (6)$$

求解方程组(6), 运用逐步逼近的方法, 假设 $\xi=0$, 则散度项可简化为 $-fD$. 用简化后的方程组解出各网格点上的 V_u 值, 进而求出 ξ 值的分布. 然后再将 ξ 值代入散度项重新求解方程组(6). 这样逐步逼近之后, 可求出较为真实的 V_u 、 ξ 、 D 的分布.

2 资料预处理

本文的资料取自中国气象科学研究院中尺度所的 10 cm 多普勒天气雷达, PPI 扫描范围: 方位角 $0 \sim 360$ 度, 采样间隔 1 度, 径向最大距离 300 km, 距离分辨率 300 m. 观测仰角 1.7 度. 预处理包括以下 5 个步骤: 去除噪声; 补缺测点; 退模糊; 光滑滤波; 插值到反演网格上. 退模糊是预处理中关键的一步. 退模糊首先要判断是一级模糊还是二级或多级模糊. 本文采用二维方法退模糊. 首先沿径向比较相邻点与点之间的速度差, 选取正确的模糊级别, 选择时也考虑到一些真实的可能出现的风速大梯度, 退模糊使相

邻点与点之间的速度差合理。然后再沿切向比较各个距离圈上相邻点与点之间的速度差，重复上述退模糊过程。结果表明，这种二维退模糊方法是可行的。预处理之后，根据第一部分中介绍的反演方程组求解出切向速度，然后合成二维水平风场，并进行图像显示。反演网格取极坐标内的网格，格距 $3 \text{ km} \times 3^\circ$ ，图像显示时用双线性内插法^[9]转化为直角坐标网格，格距 $7.5 \text{ km} \times 7.5 \text{ km}$ 。

3 结果检验与对比

为了检验涡度-散度方法反演风场技术，对1994年7月11~13日出现在华北地区的强降水天气过程的部分多普勒天气雷达资料进行反演试验，并将其结果与天气实况进行对比与检验。

7月12日河北和北京地区出现了特大暴雨。从7月12日08:00和20:00(LT)的500 hPa流场图上看，雷达测站附近偏南气流转为西南气流且强度加强。从7月12日14:00和20:00地面流场图上，可见雷达测站附近有一涡旋发展。图1(a, b, c, d)是采用涡度-散度方法对7月12日14:55、15:51、18:52、22:53各个时次的多普勒风场资料反演出的二维水平风场图。从这4张图的连续演变过程来看，反演出来的流场有以下特征：在东南方有偏南气流，西北方有偏北气流，在雷达中心附近形成了一个涡旋，而雷达东北方则有一块辐散区。随着时间的推移，东南方的偏南气流逐渐加强，并且风向逐渐转为偏西南，到22:00左右，已形成一股有组织的西南气流。同时，西北方的偏北气流一直维持着，雷达中心附近的涡旋环流也越来越明显，雷达东北方的辐散区也越来越强。

从天气实况看，在雷达观测到测站附近有涡旋发展时，在测站东北方40 km左右的机场出现了较强的下泻气流。反演结果中的涡旋环流发展与天气实况相对应，测站东北方的辐散区与下泻气流的实况相对应。出现下泻气流的位置正好是强辐散区(见图1d)。反演结果与天气实况大体是一致的。

另外，将涡度-散度方法的反演结果与VAP方法的处理结果进行了对比。从大范围看，VAP方法反演出的流场分布与涡度-散度方法的反演结果大致相同。但是，从流场的细微结构看，涡度-散度方法比VAP方法有明显的优越性。它能够较好地反映风场的细微结构，如小的辐合、辐散区等，而VAP方法则难于反映风场的细微结构。可能是VAP方法应用了局地均匀假定，这样反演出的风场对小尺度扰动很难反映。

4 结束语

(1) 涡度-散度方法是单部多普勒雷达资料反演风场的一种新尝试。由于较多地考虑了涡度和散度，它能对尺度较小的强对流系统有较好的描述。初步结果表明，它将有较广泛的适用性。

(2) 本文的涡度-散度方法只考虑了二维的情况，而且在方程简化过程中忽略了垂直项。在实际中小尺度天气过程中，垂直项的影响是难于忽略的，只有把涡度-散度方法扩

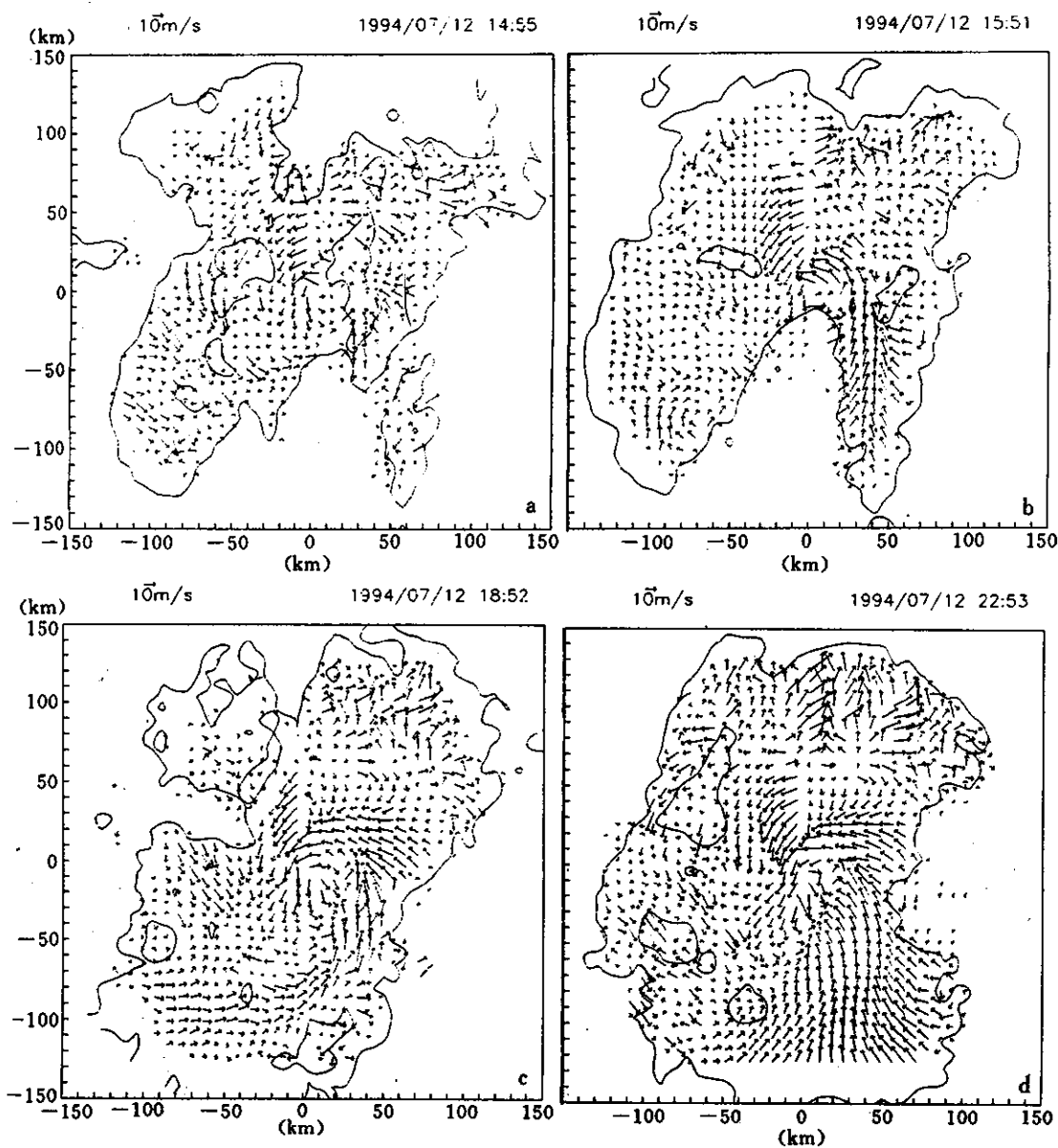


图1 用涡度-散度方法反演出的二维水平风场图(外廓线为回波轮廓)(a)1994年7月12日14:55 (b)1994年7月12日15:31 (c)1994年7月12日18:52 (d)1994年7月12日22:53

Fig. 1 Two-dimension horizontal wind field retrieved by Vorticity-Divergence method on July 12, 1994 (the external profile is the isogram of echo intensity) (a)14:55 (b)15:31 (c)18:52 (d)22:53

展到三维, 才能获得更真实的流场结构. 可以结合大气运动的连续方程, 将其扩展到三维. 另外, 也可通过各高度层上的二维水平风场获得三维风场. 这部分工作正在进一步研究.

(3) 另外, 本文在对涡度、散度的使用中, 有可能会使本来不太强的天气系统的涡旋及辐合、辐散量被夸大. 这将有待于更多的实例研究和检验.

致谢: 在本文完成过程中, 中尺度气象研究所的张沛源、彭红等同志以及北京大学的毛节泰教授曾提出过许多宝贵建议, 在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- 1 Lhermitte R M and Atlas D. Precipitation motion by pulse Doppler. Preprints Ninth Weather Radar Conf. Amer. Meteor. Soc. , 1961. 218~223.
- 2 Caton P G . The measurement of wind and convergence by Doppler radar. Preprints Tenth Weather Radar Conf. Amer. Meteor. Soc. , 1963. 290~296.
- 3 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.
- 4 Easterbrook C C. Estimating horizontal wind fields by two dimensional curve fitting of single-Doppler radar measurements . Preprints 16th Radar Meteorology Conf. Houston; Amer. Meteor. Soc. , 1975. 214~219.
- 5 Waldreufel P and Corbin H. On the analysis of single-Doppler radar data. *J. Appl. Meteor.* , 1979, 18: 532~542.
- 6 宋春梅, 葛润生, 张沛源. 单多普勒天气雷达对二维水平风场的探测研究. 见: 中尺度气象文集, 北京: 气象出版社, 1993. 1~7.
- 7 陶祖铨. 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.
- 8 杨国祥, 何齐强, 陆汉城. 中尺度气象学. 北京: 气象出版社, 1989.
- 9 顾松山, 姜海燕, 刘晓阳, 等. TVGA 图形适配器对多普勒风速的显示. 南京气象学院学报, 1993, 16(4): 446~450.

A NEW RETRIEVAL TECHNIQUE FOR SINGLE-DOPPLER RADAR

Jiang Haiyan Ge Runsheng

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

This paper presents a new method called Vorticity-Divergence method (V-D method) for retrieving horizontal wind field from single-Doppler radar PPI. Retrieval experiments are conducted using the Doppler radar observational data on July 12, 1994 with the V-D method. The results are compared with the actual synoptic situation. It is shown that the V-D method is a effective one for the single-Doppler radar wind field retrieval.

Key words: Single Doppler radar Horizontal wind field Retrieval