

# 多部多普勒雷达同步探测三维风场反演系统

周海光

王玉彬

(中国气象科学研究院,北京 100081)

(北京市气象局)

## 提 要

“我国重大气候和天气灾害的形成机理与预测理论研究”项目首次启用双多普勒雷达组网同步观测,如何从同步观测的暴雨资料中反演三维风场,具有重要的理论和现实意义。根据项目需要,建立了国内首套多部多普勒天气雷达同步探测三维风场反演软件系统;并反演出2001年7月13日由双多普勒雷达同步观测到的一个中 $\beta$ 尺度暴雨系统的三维风场,结果显示,该三维风场结构合理,系统能满足外场试验的要求。

**关键词:** 双多普勒天气雷达 三维风场 反演 软件系统

## 引 言

多普勒天气雷达能够探测降水粒子的径向速度和反射率因子等信息,通过反演理论由这些物理量得到三维风场,对于研究中小尺度天气系统的机理和提高临近预报的准确率,具有十分重要的意义,这也是雷达资料同化的关键,多部雷达同步探测可以明显提高三维风场的反演精度和可靠性。

2001年6~7月,973“中国暴雨”项目首次启用双多普勒雷达组网同步观测,获取了大批宝贵的长江中下游暴雨资料,这在中国野外试验科学史上具有重要意义,也为研究中国天气灾害的形成机理和预测理论,奠定

了基础。如何分析这些资料,并通过风场反演理论得到暴雨系统的三维风场,是该课题取得重大理论突破的关键之一。本文利用变分法,建立了国内首套多部多普勒天气雷达同步探测三维风场反演软件系统<sup>[1]</sup>,并使用双多普勒雷达资料反演出中 $\beta$ 尺度暴雨系统三维风场,给出了初步结果。

## 1 三维风场反演理论

### 1.1 反演理论的回顾

1969年,Armijo<sup>[2]</sup>从理论上给出了笛卡尔坐标系中用多部雷达联合反演三维风场的方程组;1970年,Lhermitte等<sup>[3]</sup>提出了双多普勒雷达“共面”(COPLAN)反演技术,后经

Miller 等<sup>[4]</sup> 将其完善, 缺点在于需要多次空间插值, 降低了反演精度; 1980 年, Ray 等<sup>[5]</sup> 提出 ODD 技术 (overdetermined dual-Doppler), 由欧拉方程反演风场; 1996 年, Chong 等<sup>[6]</sup> 在此基础上提出了 EODD 技术 (extended ODD), 解决了迭代算法的缺点; 之后, Bousquet 等<sup>[7]</sup> 又发展了多部多普勒雷达综合和连续调整技术 (MUSCAT), 一步完成三维风场的求解, 用于机载雷达风场反演; 2001 年, 周海光等<sup>[8]</sup> 将 MUSCAT 用于地基多部多普勒雷达三维风场反演 (简称地基 MUSCAT), 数值试验表明这种技术反演效果较好。

### 1.2 地基 MUSCAT 技术

地基 MUSCAT 反演技术采用变分法, 定义如下泛函:

$$F = \int_S [A(u, v, w) + B(u, v, w) + C(u, v, w)] dx dy \quad (1)$$

通过一阶导数为零, 可以得到速度场 ( $u, v, w$ ), 即令:

$$\frac{\partial F}{\partial u} = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial v} = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial w} = 0 \quad (2)$$

式中,  $A$  为数据调整项,  $B$  为质量连续方程的最小二乘法表达式,  $C$  为微分约束, 滤去风场的小尺度扰动, 并有滤波作用。其中,

$$A_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^{n_p} \sum_{q=1}^{n_q(p)} \omega_q [\alpha_q u + \beta_q v + \gamma_q (w + V_t) - V_q]^2 \quad (3)$$

$\omega$  是三维 Cressman 椭球插值函数, 由于该项目试验中雷达采样点较稀疏, Cressman 垂直半径取 1.5km, 比原始 MUSCAT 中的大;  $p$  是用于反演的雷达数目 ( $p \geq 2$ ),  $q$  是落入 Cressman 椭球的第  $p$  个雷达的观测点数目,  $V_q$  是降水粒子的径向速度。

粒子下落末速度  $V_t$  与反射率因子  $Z$  有如下关系式:

$$V_t = 2.65 Z^{0.114} (\rho_0 / \rho)^{0.4} \quad (4)$$

密度和温度有如下关系式<sup>[9]</sup>:

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

其中  $\rho_0$  为地面密度,  $g$  为重力加速度,  $N$  为混合空气分子量,  $r$  为雷达径向距离,  $\theta$  为雷

达的仰角,  $R$  为理想气体常数,  $T$  为绝对温度。

$B$  和  $C$  项的表达式可以参见文献[7]和[8]。

### 2 软件系统

系统采用 Visual C++ 和 Visual Fortran 混合编程, 运行在 Windows 95/98/Me/2000/NT 平台上。Visual C++ 是面向对象的语言, 可以提高代码的可重用性、可扩充性和可维护性; Fortran 提供的数学函数库精度高、效率高。

采用模块化的设计思想, 分为六个子系统, 依次是: 雷达原始数据采集和预处理、雷达原始数据转换、雷达原始产品生成与显示、MUSCAT 三维风场反演、三维风场显示和三维风场数据转换等。各子系统相互独立, 图 1 给出了系统的流程。

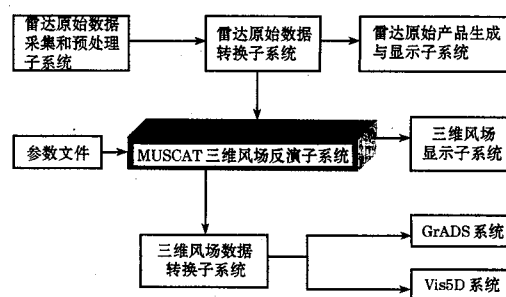


图 1 多部多普勒天气雷达同步探测三维风场反演软件系统流程图

#### 2.1 雷达原始数据采集和预处理子系统

完成雷达资料的去噪声、补缺测点、退模糊和平滑滤波等质量控制工作。

#### 2.2 雷达原始数据转换子系统

将雷达原始数据转换成反演子系统规定的格式。目前, 国内各个厂家的多普勒雷达的原始数据格式不统一, 本项目试验采用的两对 (四部) 多普勒雷达出自两个厂家, 有三种数据格式, 给反演带来了大量的数据处理工作。本文定义一种反演子系统使用的雷达数据格式, 使得反演子系统所使用的数据格式与实际雷达的数据格式相互独立, 当一种新的数据格式进入软件系统时, 只需添加相应的数据转换模块即可。

#### 2.3 雷达原始产品生成与显示子系统

显示雷达 PPI 强度和径向速度,供用户分析,以确定最合适的反演区域。

#### 2.4 MUSCAT 三维风场反演子系统

用户通过参数文件控制反演区域的位置、范围、反演网格的格距,子系统使用系统定义的数据格式进行反演,与实际雷达的数据格式相互独立。

#### 2.5 三维风场显示子系统

显示反演得到的三维风场,供用户可视化分析。

#### 2.6 三维风场数据转换子系统

近些年来,气象数据可视化软件 GrADS 和 Vis5D<sup>[10,11]</sup>得到了广泛使用,该子系统可将反演得到的数据转换成上述两种软件所支持的数据格式。

### 3 三维风场反演实例

#### 3.1 双多普勒雷达同步观测简介

2001年6~7月,本项目试验在湖北和安徽设置了两个双多普勒雷达同步观测区,本文使用安徽的双多普勒雷达同步观测获取的暴雨体扫数据,利用上述软件反演其三维风场。

合肥(117.23°E, 31.87°N)的 WSR-98D 雷达使用 VCP11 工作模式,每个体扫有 14 层数据,径向速度库长为 250m,反射率因子库长为 1km,径向库数依仰角层和数据种类不同而略有变化。马鞍山(118.52°E, 31.70°N)采用 3830 雷达,每个体扫 14 层,库长 300m,径向 500 个库,最大径向探测距离为 150km,每层扫描径向有 512 根。雷达资料依据图 1 流程进行反演。

图 2 给出了合肥、马鞍山双雷达同步观测区和用于反演的区域,两部雷达基线的长度为 124km,圆 A 和 B 分别表示合肥与马鞍山雷达各自的观测区,矩形区域 C 是反演区域。C 区左下角位于 117.80°E, 31.93°N,空间范围 90km×90km×12km,分辨率 1km×1km×0.5km, Cressman 插值函数的水平半径取 2.5km,垂直半径取 1.5km。

#### 3.2 天气形势及雷达回波演变

2001年7月13日受冷空气和中低层切变线影响,在安徽中南部、江苏中南部和浙江北部出现了降水,其中部分地区出现暴雨,全

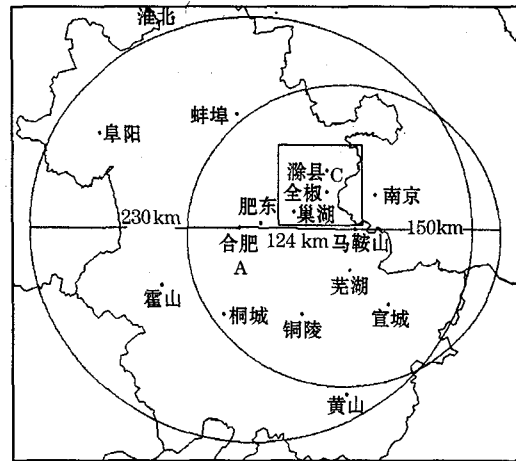


图 2 合肥、马鞍山双多普勒雷达同步观测示意图  
椒最大降水为 104.4mm,这是 2001 年本项目外场试验区出现的范围最大的一次强降雨。从雷达回波演变来看,7月13日下午,强度为 50dBz 的对流云团在安徽和江西附近合并,形成带状回波,并向北抬升,于 18:11 左右经桐城、铜陵和宣城进入同步观测区;晚上,21:10 左右形成弓状回波,强回波主体达 55dBz 左右,呈西北—东南走向,并向马鞍山站东南方向移动,于 23:11 回波移出同步观测区;在 3km 高的 CAPPI 图像上回波移动趋势更明显。

#### 3.3 三维风场分析

本文选取双多普勒雷达同步观测区内回波最强时段(北京时 7 月 13 日 21:12:16 至 21:17:50)的同步体扫资料,反演暴雨系统的三维风场。

图 3 分别给出了 3km 和 5km 高度上水平速度矢量、垂直速度等值线和回波强度等值线。图 3a 的右下区域有一辐合带,对应图 3b 的上升运动,这就造成水汽的向上垂直输送,低层水汽的辐合是暴雨的一个主要水汽来源;图 3a 的左下区为辐散区域,对应图 3b 的下沉运动,下沉气流能形成近地面的冷空气堆或强烈的向外流出的辐散气流,可促使暴雨系统前方低层暖湿空气的上升;图 3d 和图 3e 也有类似的结构。3km 和 5km 两个高度层上垂直速度的分布合理,在反演区域的南部有一明显的垂直环流。总之,从图 3 看,中尺度辐合带和对流系统的配置合理。

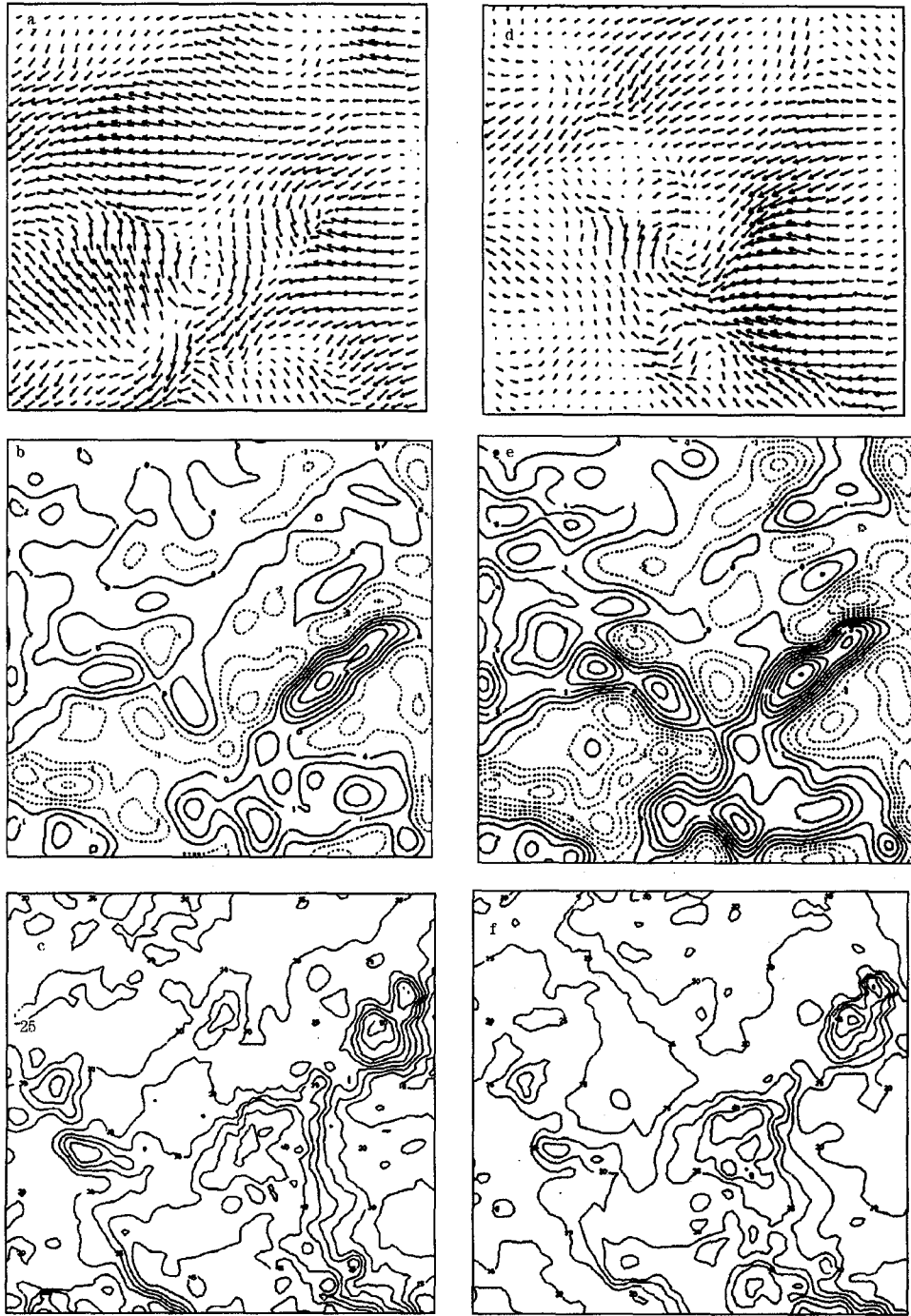


图3 水平速度矢量、垂直速度等值线和回波强度等值线  
(a)3km 高度的水平速度矢量 (b)3km 高度的垂直速度等值线 (c)3km 高度的回波强度等值线  
(d)5km 高度的水平速度矢量 (e)5km 高度的垂直速度等值线 (f)5km 高度的回波强度等值线  
(速度单位: $m \cdot s^{-1}$ ; b、e 中实线表示上升运动,虚线表示下沉运动;回波强度单位:dBz)

4 结论

(1)双(叁)多普勒雷达三维风场反演技术中,插值算法对反演影响很大,本文只使用一次 Cressman 插值,避免了共面算法由于多次插值造成的较大误差;连续方程的平方项作约束条件,使积分连续方程所造成的误差累积有了改善,而这正是反演技术中最难解决的。

(2)本文以地基 MUSCAT 为核心反演算法,建立了国内首套多部多普勒天气雷达同步探测三维风场反演软件系统,反演得到的中  $\beta$  尺度暴雨系统的三维风场结构合理;对于  $70\text{km} \times 70\text{km} \times 12.5\text{km}$  的反演区域,在 P4/1.7GHz 的微机上,由两部雷达同步体扫资料反演一个三维风场需要 410 秒,本项目试验多普勒雷达完成一个体扫需要 6~7 分钟,因而系统可以达到准实时,在现场就可以给科研人员提供灾害性天气的较为精确的三维风场结构,满足 2002 年外场试验要求。

(3)该系统可以用于研究灾害性天气系统的三维风场,籍以研究其形成机理;如何将三维风场作为数值模式的初始场,即雷达资料的同化,是今后重要的研究课题之一。

参考文献

1 我国重大天气灾害的形成机理和预测理论研究

(G1998040906-12)2001 年度总结报告,中国气象科学研究院 973 项目管理办公室,2001,12.

2 Armijo L. A theory for the determination of wind and precipitation velocities with Doppler radar. *J. Atmos. Sci.*, 1969,26:570—573.

3 Lhermitte R M, Miller L J. Doppler radar methodology for the observation of convective storms[A]. In: 14th Radar Meteorology Conference[C]. American, Tucson: American Meteor. Society, 1970:133—138.

4 Miller L J, Strauch R G. A dual-Doppler radar method for the determination of wind velocities within precipitating weather systems[J]. *Remote Sens. Environ.*, 1974,3(4): 219—235.

5 Ray P S, Ziegler C L, Bumgarner W, et al. Single and multiple Doppler radar observations of tornadic storms[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1980,108(10):1607—1625.

6 Chong M, Campos C. Extended overdetermined dual-Doppler formalism in synthesizing air-born Doppler radar data[J]. *J Atmos Oceanic Tech*, 1996,13(3):581—597.

7 O Bousquet, Chong M. A multiple-Doppler synthesis and continuity adjustment technique (MUSCAT) to recover wind components from Doppler radar measurement. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1998,13:343—359.

8 周海光,张沛源.基于笛卡尔坐标系的双多普勒天气雷达三维风场反演技术(气象学报待发表).

9 Doviak R J, Dusan S Z. *Doppler Radar and Weather Observation*. California: Academic Press Inc, 1984. 304—311.

10 贝刚.用 Vis5D 软件包在 PC 机上实现模式预报输出结果的可视化. *气象*, 2000,26(11):14~18.

11 王洪庆,张焱,陶祖钰等. 五维大型复杂数据集计算机可视化. *自然科学进展*, 1998,8(6): 742~747.

A Retrieving System of Three-Dimensional Wind Fields by Multiple-Doppler Radar

Zhou Haiguang

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Wang Yubin

(Beijing Meteorological Bureau)

Abstract

"973" key project—China Heavy Rain Experiment and Study (CHeRES) used dual-Doppler radar to measure the heavy rain in the middle and lower reaches of Changjiang River in 2001, it is the very important to retrieve the three-dimensional wind fields using the radar volume scan data. A software system is developed that can retrieve the three-dimensional wind fields from the data measured by multiple-Doppler radar synchronously. The three-dimensional wind fields of a meso- $\beta$  heavy rain measured by dual-Doppler radar on July 13th 2001 are retrieved and analyzed by using this software system. The results show that the wind field structure is reasonable, and the system can meet the requirements of the experiment.

**Key Words:** dual-Doppler weather radar three-dimensional wind field retrieve Software system