

多普勒雷达反演技术及雷达资料 在数值模式中的应用^①

许小永

郑国光

(南京气象学院, 南京 210044)

(中国气象局)

提 要

近几十年,多普勒雷达资料,在强对流天气-监测及预报中广泛应用。随着我国新一代天气雷达网的建成,如何充分利用其探测资料,成为气象工作者关注的问题。该文分析和总结了国内外多普琳雷达反演技术研究和雷达资料在数值模式中的应用和同化研究现状,并作了一些讨论。

关键词: 多普勒雷达 反演 数值模式 应用 同化

引 言

随着业务多普勒雷达探测覆盖面和探测能力的迅速增加,如何充分利用多普勒雷达探测资料,从中尽可能多地提取有意义的气象信息,并改善数值模式的初始场,从而提高模式预报效果,是气象工作者越来越关心的问题。回顾了国内外多普勒雷达反演技术研究和雷达资料在数值模式中的应用和同化研究现状,并作了一些总结和展望。

1 单多普勒天气雷达风场反演技术

单多普勒雷达反演风场的方法大体可分为三类。第一类空间几何学方法。20世纪60年代 Lhermitte 等^[1]和 Browning 等^[2]提出 VAD(速度方位显示)方法,在均匀风或线性风的假定条件下,由径向风反演出水平方向上的平均风向风速。SriVastaVa 等将 VAD 方法加以改进和推广,称之为 EVAD 法,它与 VAD 法的关键区别在于假定在某一高度的平面上,水平散度和垂直速度在较小的高度间隔内不变。陶祖钰^[3]在均匀风方

法基础上,提出了 VAP(速度方位处理)方法,假定相邻方位角的风矢量相等,运用几何方法求二维风场。郎需兴等假定单位分析单元内部风场均一,通过变分得到水平切向风,进而得到水平风场。上述方法大都基于线性假设,最近,赵坤等^[4]提出一种以非线性近似理论为基础的反演方法,考虑了风场分片光滑的特点并充分利用径向风场数据,取得了较好的结果。第二类统计拟合方法。Waldteufel 等^[5]提出 VVP(速度体积处理)技术,对径向速度作线性展开,再由最小二乘法求二维风场分布。Tuttle 等^[6]提出 TREC(回波跟踪)法,假定反射率或径向速度守恒,将连续时次的 PPI 扫描平面分割成若干大小的面元,利用求相关的方法,计算出扫描间隔时段内的风矢量。第三类动力学方法。Sun 等^[7]提出了四维变分(4DVAR)同化反演方法,主要过程是:应用 4DVAR 资料同化的方法到云尺度模式,通过极小化雷达观测结果和模式预报结果差别,将单(多)部多普勒

^① “十五”国家科技攻关计划(2001BA610A)资助

雷达观测的径向速度和雷达反射率同化到数值模式中,当模式预报结果最接近雷达观测结果时,得到一组最优初始场,此时,模式输出结果作为雷达反演结果。Qiu 和 Xu^[8]提出 SA(简单伴随)反演方法,采用反射率或径向速度的守恒方程及其伴随方程反演风场。Wu 等对柱坐标下大气运动方程组中垂直方向物理量进行简化,化成二维平面上的方程组来反演 PPI 风场。Laroche 等提出了单多普勒雷达反演三维风场的半伴随方法,此方法考虑了径向速度测量误差,确保了反演过程中连续方程的精确满足,反演过程中假定反射率和径向速度是守恒的。姜海燕和葛润生^[9]提出涡度-散度方法,假定涡度场定常,结合涡度和散度定义,利用中尺度涡度方程求风场。

2 双/三多普勒雷达风场反演技术

从理论上讲,多部多普勒雷达联合探测能够明显提高三维风场的反演精度。从 20 世纪 60 年代末,国外就开展了双/三多普勒雷达风场反演技术的研究。Armijo^[10]和 Ray 等^[11]提出直接合成方法又称迭代法,用三维速度场与雷达探测到的径向速度关系式及质量连续方程在笛卡儿坐标系中建立方程组求解三维风场。Chong 等提出 ODD 和 EODD 技术,将地球表面作为平面处理,通过最小二乘法并引入质量连续方程作为约束条件求解三维风场。Miller 等^[12]提出共面反演技术,通过两部多普勒雷达同步扫描某些斜面,反演三维风场。Bousquet 和 Chong 等^[13]提出 MUSCAT 反演技术,通过变分方法,求取三维风场。Sun 等提出的 4DVAR 同化方法亦可用于双/三多普勒雷达反演。

3 热力场和微物理场反演方法

除了反演风场外,许多研究者研究了从雷达资料反演热力场和微物理场的方法。热力场反演的一般方法是先反演三维风场,然后再将反演的风场代入 Navier-Stokes 方程组得到热力场^[14]。Liou 研究了将雷达观测资料和一整套流体动力方程组结合起来的反

演热力场方法,提出前向插入算法。Ziegler^[15]应用诊断动力云模式从双多普勒雷达合成风场反演热力场和微物理场。Hauser 和 Amayenc^[16]在假定风场和热力场由动力反演方法得到的条件下,由总含水量的连续方程反演微物理量。上述有关微物理场反演研究都假定云系统处在稳定状态。Verlinde 和 Cotton 采用 Rutledge-Ziegler 算法研究了不稳定状态时,云微物理场的反演。接着 Verlinde 和 Cotton^[17]又采用动力微物理模式和伴随方法,在考虑动力参量下,反演微物理参量。受此鼓舞,Sun 等^[18]建立了反演云中三维风场、热力场和微物理场的变分多普勒分析系统(VDRAS),其基本组成包括:含有暖雨参数化方案的云模式和它的伴随、价值函数和 4DVAR 同化方法。模拟雷达资料和实测雷达资料的反演试验结果都表明 VDRAS 能在一定程度上得到三维风场、热力场和微物理场等风暴的细微结构。

4 雷达资料在数值模式中的应用及同化

徐枝芳等^[19]将雷达回波资料加入中尺度模式 MM5 中,调整模式的水汽场,对暴雨进行了模拟预报试验,取得很好效果。Robert 提出了一种将雷达反射率资料应用到中尺度模式初始场中的方法:由反射率资料确定湿对流发生地点,在有湿对流发生的模式网格点,启动对流参数化方案,将对流参数化得到的降水率和热力廓线与局地环境匹配起来。研究表明,用这样的方法将雷达反射率引入中尺度模式中,由于增强了对中尺度环境的描述,降水和中尺度环境预报有明显提高。Steven 在进行 LAPS(局地分析预报系统)风分析中,对多普勒雷达径向风资料处理方法是先将径向风投影到 LAPS 格点上,并进行质量控制,然后与格点上由其他资料分析得到的切向风合成,最后得到模式预报所需要的初始风场。一系列多普勒雷达反演技术的出现,为在数值模式初始场中使用多普勒雷达资料奠定了基础。Shapiro 等^[20]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。Crook 和 Tuttle 利用 TREC 法反演的风场初始化非流体静力模式,预报边界层流场。一些学者利用多普勒雷达得到的雷暴显式结构来初始化云模式并进行预报。Warner 等^[21]用 VDRAS 分析的初始场对美国 Colorado 州的一次暴洪作了 2 小时数值预报,结果令人鼓舞。邱崇践等^[22]采用变分反演方法和 Gal-Chen 等提出的热力反演技术,得到 ARPS 模式预报所需初始场的基本要素。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效果。

在雷达资料同化方面,许多研究者作了大量研究。Wang 和 Warner^[23]用牛顿松弛和潜热强迫将雷达资料四维同化到模式中,取得了较好效果。他们的工作是利用雷达资料估计的降水率和由雨量计资料得到的每小时降水量确定三维潜热加热场,在预报过程中加入到模式热力方程的非绝热项起作用。Sun 等建立了多普勒雷达变分分析系统 VDRAS,采用 4DVAR 方法直接将雷达径向速度和反射率同化到云模式中。Guo^[24]将 15 部 WSR-88D 和 500 个雨量计测得的每小时降水同化到中尺度模式 MM5 中,结果表明,降水总量和降水形势预报有较大改进。Michelson 等^[25]将多普勒雷达 VAD 风场同化到 MM5 中,结果显示,同化 VAD 风场可以明显减少模式风场预报误差。另外,NOAA 预报系统试验室的 McGinley 等和美国 Oklahoma 大学风暴分析和预报中心的 Xue 等也一直在研究将雷达资料同化到他们的原型模式中的方法。国内许多工作者也在雷达资料同化方面做了研究。马清云和李泽椿等^[26]采用局部 VAD 法,将多普勒雷达测得的径向风反演成水平风,加入到同时次 GTS 观测资料中,然后应用到数值天气预报(NWP)同化系统中,进行同化预报试验。结果表明,反演的雷达风基本符合事实,将其应用到 NWP 中,有助于分析和预报较小的中尺度系统。最近,广州热带气象研究所提出

了把雷达反射率变化转换成雷达“视风速”,和雷达径向风结合,反演大气三维风场的技术,并将该方法应用到中国数值预报创新基地开发的三维变分同化系统 GRAPES3DV 中。

5 讨论

通过以上总结,分析讨论如下:

(1)VAD 方法只能得到平均风场及其随高度的变化,在实际应用中局限性很大。VVP 方法计算比较复杂,理论分析表明只有在样本数量很大的情况下才能达到必要的精度,因此其空间分辨率不能满足中尺度分析的要求。VAP 方法假设条件过强,只适合于较大范围,径向风测量误差对水平风场计算影响很大,须通过线性平滑来进行滤波,因此滤掉了部分风场信息。涡度-散度方法由于考虑了涡度和散度,因此对较小尺度的对流系统有较好的描述,但会使本来不太强的天气系统的涡旋和辐散运动被夸大。回波跟踪法、简单伴随法以及半伴随法等都基于反射率或径向速度守恒的假设,在实际观测中这常常不能满足。变分同化反演方法,除反演三维风场以外,还能同时得到其他一些气象要素场,如:温度、气压、水汽混合比、雨水混合比和云水混合比等热力场和微物理场,是现代多普勒天气雷达趋于采用的反演技术,但计算量庞大,需要连续的观测资料,该方法目前处于研究阶段。

(2)就多部多普勒雷达反演而言,迭代法和 ODD 技术只能使用较底层仰角的径向速度资料,否则粒子下落末速度在径向上分量较大,影响反演精度。共面反演技术需要多次插值,降低了反演精度。从近几年的研究成果来看,基于变分法的反演技术精度较高。

(3)在众多反演技术中,近十几年来发展的方法大多采用约束模式把雷达观测和物理约束结合起来反演大气二维或三维运动。约束模式既可以简单到雷达回波运动轨迹,也可以复杂到包含对流尺度物理过程的运动方程组。在变分分析中模式又分为强约束和弱

约束。当模式为强约束时,所有分析和反演变量要求严格满足模式。当模式是弱约束时,极小化观测结果和模式预报结果之间差异,但是允许差异存在,这就意味着分析和反演变量不必严格满足模式。Laroche 和 Zawadzki 提出的半伴随方法,则充分利用强约束和弱约束结合,使计算代价与实时业务需求兼容。

(4)到目前为止,业务预报模式中的雷达资料同化,一般限于雷达产品如:VAD 风场和雷达反射率导出的云和降水场同化。雷达资料用于数值预报研究,特别是多普勒雷达资料在数值模式中的同化研究还刚刚起步,还处在理论的不完善阶段,很多方面尚需进一步研究。

(5)用常规观测资料初始化云模式的通常方法是:一从探空结果加随意扰动如暖或冷扰动到水平均匀风场模拟对流尺度系统,其缺点是导致对流发展对初始低层强迫取向的强烈依赖以及模式自身的旋转加强时间 Spin-up time;二从大尺度分析进行嵌套网格模拟,但是这个方法涉及了太多的过程。近年来,人们对云尺度数值预报的越来越感兴趣,并在多普勒雷达资料同化到云模式以及用多普勒雷达资料初始化云模式方面取得了较大进步。相信随着雷达探测技术的发展和模式分辨率的稳步增长,雷达资料必将在未来的对流尺度同化系统中界定云模式初始场中发挥更重要作用。

(6)Sun 等发展的变分多普勒分析系统 VDRAS 无论在雷达反演技术上还是在雷达资料同化技术上都取得了巨大成功,其中同化晴空边界层多普勒雷达资料的 VDRAS 已投入业务使用。今后进一步完善 VDRAS,并使得业务 VDRAS 能同化整个对流层的多普勒雷达资料,实时预报云中三维风场、温压场和微物理场是雷达应用技术研究的一个重要方向和任务,但是要完成这项任务还有一段艰难的路要走。除了受计算时间的约束外,主要技术困难有:(a)雷达资料仅仅覆盖

有云地区,通常大部分面积无资料,这就使得背景场显得比较重要,目前 VDRAS 中通常假定背景场误差协方差是对角矩阵,采用的背景场比较简单,为了更准确地描述大气环境,必须采用更复杂、更合理的背景场方案。(b)模式中的微物理过程对反演结果影响很大,目前普遍采用的是暖雨方案,将来还要考虑冰相过程,但这又使得伴随模式的获得和积分变得更困难复杂。(c)反射率是通过 Z - qr 关系同化到模式中,而 Z - qr 关系受雨滴谱等影响,因此单一 Z - qr 关系会使得反射率 Z 估计的雨水混合比 qr 误差可能较大。Sun 等研究证明综合雷达反射率和差反射率能更好地估计雨水混合比,因此在未来的应用中最好能同化双偏振多普勒雷达资料。

参考文献

- 1 Lhermitte R M, Atlas D. Precipitation motion by pulse Doppler. Preprints Ninth Weather Radar Conference. Amer. Meteor. Soc., 1961:218—223.
- 2 Browning K A, Wexler R. The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar. J. Appl. Meteor., 1968, 7(1):105—113.
- 3 陶祖钰. 从单 Doppler 雷达速度场反演矢量场的 VAP 方法. 气象学报, 1992, 50(1):81—90.
- 4 Zhao kun(赵坤), Liu guoqing, Ge wenzhong. Retrieval of single-Doppler radar wind field by nonlinear approximation. Adv. Atmos. Sci., 2003, 20(2):195—204.
- 5 Waldteufel P, Corbin H. On the analysis of single-Doppler radar data. J. App. Meteor., 1979, 18: 532—542.
- 6 Tuttle J D, G B Foote. Determination of the boundary layer airflow from a single Doppler radar. J. Atmos. Oceanic. Tech., 1990, 7:218—232.
- 7 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.
- 8 Qiu C J, Xu Q. A simple adjoint method of wind analysis for single-Doppler radar data. J Atmos Oceanic Tech. 1992, 9:588—598.
- 9 姜海燕,葛润生.一种新的单部多普勒雷达的反演技术.应用气象学报, 1997, 8(2):219—223.
- 10 Armijo L. A theory of the determination of wind and precipitation velocities with Doppler radar. J. Atmos. Sci., 1969, 26(3):570—573.

- 11 Ray P S, Ziegler C L, Bumgarner W, et al. Single and multiple Doppler radar observations of tornadic storms. *Mon. Wea. Rev.*, 1980, 108(10):1607—1625.
- 12 Miller L J, Strauch R G. A Dual-Doppler radar method for the determination of wind velocities within precipitation weather systems. *Remote Sense Environ*, 1974, 3(4): 219—235.
- 13 Bousquet O, Chong M. A multiple-Doppler synthesis and continuity adjustment technique (MUSCAT) to recover wind components from Doppler radar measurement. *J. Atmos. Oceanic Tech*, 1998, 15(13):343—359.
- 14 Gal-Chen T, R A Kropfli. Buoyancy and pressure perturbations derived from dual-Doppler radar observations of the planetary boundary layer: applications for matching models with observations. *J. Atmos. Sci.*, 1984, 41: 3007—3020.
- 15 Ziegler C L. Retrieval of thermal and microphysical variables in observed convective storms. Part I: Model development and preliminary testing. *J. Atmos. Sci.*, 1985, 42: 1487—1509.
- 16 Hauser D, P Amayenc. Retrieval of cloud water and water vapor contents from Doppler radar data in a tropical squall line. *J. Atmos. Sci.*, 1986, 43:823—838.
- 17 Verlinde J, W R Cotton. Fitting microphysical observations of nonsteady convective clouds to a numerical model: An application of the adjoint technique of data assimilation to a kinematic model. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, 121:2776—2793.
- 18 Sun J, A Crook. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud and its adjoint. Part I: Model development and simulated data experiments. *J. Atmos. Sci.*, 1997, 54:1642—1661.
- 19 徐枝芳, 徐玉貌, 葛文忠. 雷达和卫星资料在中尺度模式中的初步应用. *气象科学*, 2002, 22(2):167~173.
- 20 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.
- 21 Warner T T, E E Brandes, C L Mueller, et al. Prediction of a flash flood in complex terrain, Part I: A comparison of rainfall estimates from radar, and very short range rainfall simulations from a dynamic model and an automated algorithmic system. *J. Appl. Meteor.*, 2000, 39: 797—814.
- 22 邱崇践, 余金香, Qin Xu. 多普勒雷达资料对中尺度系统短期预报的改进. *气象学报*, 2000, 58(2):244~249.
- 23 Wang W, Warner T T. Use of four-dimensional data assimilation by Newtonian relaxation and latent-heat forcing to improve a mesoscale model precipitation forecast: A case study. *Mon. Wea. Rev.*, 1988, 116:2593—2613.
- 24 Guo Y, Y H Kuo, J Duhia. Four - dimensional variational data assimilation of heterogeneous mesoscale observations for a strong convective case. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, 128:619—643.
- 25 Michelson S A, N L Seaman. Assimilation of NEXRAD - VAD winds in summertime meteorological simulations over the northeastern United States. *J. Appl. Meteor.*, 2000, 39:367—383.
- 26 马清云, 李泽椿, 陶士伟. 单多普勒天气雷达风场反演及其在数值预报中的应用试验. *应用气象学报*, 2001, 12(4):488~493.

Methods of Retrieving from and Application of Doppler Radar Observations in a Model

Xu Xiaoyong¹ Zheng Guoguang²

(1. Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044; 2. China Meteorological Administration)

Abstract

During the past few decades, observations from Doppler radars are widely used in diagnostic studies of convective systems, severe weather detection, and short-term forecasting. With the deployment of the NEXRAD network in China, there has been an increased interest in driving detailed meteorological information from single or multiple-Doppler observations. Methods to retrieve information from radar data and their application in numerical weather prediction are reviewed and discussed.

Key Words: Doppler radar retrieve numerical model application assimilation