

# 中国新一代多普勒天气雷达网的建设与技术应用

许小峰

(中国气象局, 北京 100081)

**[摘要]** 新一代多普勒天气雷达已成为对灾害性天气监测、预测的重要手段之一, 世界上一些发达国家已普遍使用这一技术。我国从1998年开始建设新一代天气雷达网, 已将这项工程列入国债资金支持项目。介绍了多普勒天气雷达的技术发展情况, 目前我国的建设和应用情况, 提出在发展建设中应注意的几个问题, 以及未来雷达技术在天气监测中的若干发展和应用领域。

**[关键词]** 新一代多普勒天气雷达; 技术分析; 系统建设与应用; 未来发展

**[中图分类号]** P412.25 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)06-0007-08

## 1 前言

我国是一个幅员辽阔、地形复杂、受气象灾害影响十分严重的国家。据统计, 我国每年因各种气象灾害使农田受灾面积达  $0.3 \times 10^8$  ha 以上, 受干旱、暴雨和热带风暴等重大灾害性天气、气候影响的人口约达6亿人次。平均每年因受气象灾害造成的损失约占国民生产总值的3%~5%<sup>[1]</sup>。1954年长江流域特大洪水灾害、1975年8月河南暴雨造成的惨重灾难, 令人触目惊心; 1981年7月长江上游四川盆地的暴雨、1991年7月江淮地区特大洪涝灾害, 人们至今记忆犹新; 特别是1998年夏季, 长江流域发生了继1954年以来的又一次全流域特大洪涝灾害, 举世瞩目, 松花江、嫩江流域也同时发生了百年一遇的大洪水。为了有效地监测预测灾害性天气, 为国家社会经济发展和防灾减灾提供及时的服务, 广大气象科技工作者做了许多工作, 在国家的大力支持下, 建立了一套比较有效的气象监测、预测服务系统。特别是在1998年大洪水后, 针对在气象监测业务中还存在的薄弱环节, 国务院正式批准利用国债资金在全国建立新一代多普勒天气雷达监测网, 初步确定在全国布设126部雷达, 以进一步加强对灾害性天气的监测和预测水

平。迄今为止, 已有近50部雷达相继建成, 并在实际业务中发挥效益。

新一代多普勒天气雷达能够定量探测降雨回波强度、空气径向移速、速度谱宽和降水物相态等信息。其探测对象包括降水、热带气旋、雷暴、中尺度气旋、湍流、龙卷、冰雹、冻雨、冻结层、融化层等, 并具有一定的晴空回波探测能力。是目前其他大气探测手段无法取代的重要探测系统。

## 2 天气雷达发展的简要回顾

雷达的发展可源自德国物理学家H·赫兹的实验工作。19世纪80年代后期, 赫兹证明了无线电波的存在。1922年意大利工程师G·马可尼进一步研究将无线电波反射现象用于探测目的。之后, 由于雷达在战事中的特殊意义, 使得雷达技术在英、美、德等国家获得飞快进展。特别是在20世纪40年代的二次大战时期, 雷达在军事得到了广泛应用。当时, 雷达主要是用来探测固体目标物, 特别是对飞机等移动目标的监视非常有效。

“雷达”是radio detection and ranging缩写radar的音译, 字面上含义是无线电探测和测距。实际上, 雷达是通过发射脉冲电磁波的方式测量到目标物的斜距、水平距离、方位角和仰角等参数,

从而确定该目标的位置和其他电磁反射特征。雷达通过发射机产生电磁能量,通过雷达天线将电磁能量集中形成向某一方向传播的波并向外发射。电磁波在大气中以光速( $2.998 \times 10^8$  m/s)传播,遇到目标物后会产生各方向上的散射波,其中会有一部分沿着与发射波相反的路径反射到雷达接收天线,被称为目标物的后向散射,也就是雷达探测到的回波信号。通过对回波信号的处理和分析,就可以确定目标物的位置和强度。

雷达回波强度不仅与雷达系统本身的性能有关,也与探测到的云、降水粒子的性质有关,还与被测目标的距离和周围大气环境状况有关。因此,要想通过分析回波强度获取云、降水特征,就需要综合分析各种影响要素。这项工作是通过建立雷达气象方程来完成的。目前测雨雷达使用的雷达气象方程可表示如下<sup>[2]</sup>:

$$P_r = \frac{\pi^3}{1024 \ln 2} \frac{P_t h G^2 \theta_1 \varphi_1}{\lambda^2} \frac{1}{R^2} \psi \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 Z \cdot 10^{-0.12 \int_0^R k dR}$$

式中  $P_r$  为雷达天线接收到的来自反射体的总功率,  $P_t$  为雷达发射功率,  $G$  为天线增益,  $R$  为目标物距离,  $\lambda$  为发射波长,  $\psi$  为充塞系数,  $k$  为衰减系数,  $\theta_1$  和  $\varphi_1$  分别为水平和垂直半功率点波束宽度,  $m$  为复折射指数。雷达气象方程所包含的因子较多,包括三方面:一是雷达本身的参数,如发射功率、波束宽度、天线增益等;二是气象因子,如折射指数、衰减系数等;三是雷达距目标物的距离。这些因子通过相互影响共同制约着回波的强弱。

随着雷达技术不断地发展,人们发现利用雷达可以监测到悬浮在大气中的液态或固体颗粒物,在大气中漂浮、移动的云和雨滴也能产生回波,特别是那些可以造成强降水的积雨云系,可以通过雷达清晰地捕捉到。这一发现产生了一项新的技术和一门新学科——气象雷达探测技术和雷达气象学。雷达在气象上的应用与在军事上正好相反,军事上需要的那些固体目标恰恰是探测天气系统所不需要的,包括移动飞行物、山峦、建筑物等,都需要从探测信号中滤掉,所需要的是悬浮在大气中的雨滴、冰晶等信息。

从20世纪50年代,气象雷达开始用于实际业务,一些国家先后建设了气象雷达网,使气象雷达逐渐成为研究和监测大气变化的一种重要手段。60

年代以后,随着半导体、计算机、数字通信与数据处理、自动控制等多种技术的发展与结合,使气象雷达开始真正成为一个具有高科技含量的综合系统。同时,雷达技术本身也有了显著发展,如能探测到大气径向风场的多普勒技术、能识别降水凝结物的形态、相态及其转换过程的双偏振技术等。

在天气雷达技术发展领域具有重要指标意义的是20世纪80年代到90年代中期,美国研制、开发了新一代多普勒天气雷达,并在全国建设布网,投入了业务应用。美国新一代天气雷达网的建成改进了美国中尺度天气系统的监测能力,促进了中尺度天气学的发展,同时也带动了世界范围内气象雷达的建设和应用。我国新一代多普勒天气雷达建设计划的制定也多少受到了美国取得成功的影响。

我国的业务用天气雷达建设是从20世纪60年代开始的,由于关键技术没过关,先后从英国引进了几部3 Cm雷达在我国沿海和个别重要城市使用,如马可尼-51型,坦卡-41型等。1964年开始从我国部队引入军用843型10 Cm雷达用于对台风的监测,取得初步成功,后又由厂家进行了改装,并在业务中得到正式使用。70年代到80年代,性能更优越的711、713、714等型天气雷达逐渐成为气象观测业务的主力。90年代以后,初步具有多普勒功能的天气雷达也在我国研制成功,并在业务中使用,如714SD型。

### 3 新一代多普勒天气雷达的主要技术特点

早期的常规天气雷达主要是用来探测大气中的云、雨等目标物,从20世纪50年代开始世界各国主要用的是这类雷达。在50年代末,就有科研人员开始从事将多普勒原理应用到天气雷达探测上的研究和试验,主要目的是通过多普勒频移原理,探测目标物的移动速度,这一技术的发展导致了多普勒雷达的出现,对于监测和研究天气系统具有十分重要的意义。

多普勒雷达因其能够测量发射脉冲的相移而与传统的天气雷达有区别。发射脉冲碰到运动物体时脉冲的相位会发生漂移,这种现象是奥地利物理学家Christian Doppler发现的,所以称为多普勒效应。多普勒效应最明显的例子是火车的长鸣声(不变)在火车经过您身边时您会感觉到该声音的音调由高变低。当发射的脉冲碰到风暴时,风暴体中的

运动粒子会使发射脉冲的相位发生漂移，雷达计算出相位漂移量，并将该漂移量转换成风暴体中粒子的平均运动速度，其运动方向为朝向雷达或背离雷达。天气雷达正是利用降水粒子朝向雷达或背离雷达的运动速度信息来估计风速，具体原理可表述如下：

目标物相对于天气雷达做径向运动而引起回波信号的频率变化，称为多普勒频移，以  $f_d$  表示。设多普勒天气雷达的波长为  $\lambda$ ，目标物距天气雷达的距离为  $R$ ，探测脉冲从雷达天线发射到目标物产生散射波后再返回到天线的距离为  $2R$ 。若以波长度量距离  $2R$ ，则会有  $2R/\lambda$  个波长，若以弧长度量，则相当于  $4\pi R/\lambda$  个弧度。探测脉冲在天线处发射的相位为  $\varphi_0$ ，回波信号返回到天线时的相位为  $\varphi$ ，从而有

$$\varphi = \varphi_0 - \frac{4\pi R}{\lambda} v_r$$

相位随时间的变率为  $\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{dR}{dt} v_r$

由于目标物运动而引起的回波信号相位变化率

$\frac{d\varphi}{dt}$  就是回波信号的角频率  $\omega_d$ 。从  $\omega_d = 2\pi f_d$  得

$$f_d = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR}{dt} v_r = -\frac{2}{\lambda} v_r$$

式中  $v_r$  表示径向速度。

当目标物远离雷达而去时， $v_r > 0$ ，多普勒频移为负值， $f_d < 0$ ，即回波信号的频率比发射频率的固有频率低。当目标物迎着雷达而来时， $v_r < 0$ ， $f_d > 0$ ，即回波信号的频率比发射频率的固有频率高。显然，雷达发射波长是已知的，测得多普勒频移后，可求出径向速度。

由于受到技术条件限制，多普勒雷达在五十年代未能在实际气象业务中使用。1974 年 4 月，美国强风暴实验室 NSSL 第一次用双多普勒雷达对龙卷风暴进行观测，用雷达拼图揭示了几个不同高度上龙卷风暴的运动学结构。用双多普勒雷达资料能够分析得到这一典型的中小尺度天气系统并且不被天气尺度常规探测网捕捉到的灾害天气的动力和微物理细节，给出同一时刻较为准确的风暴三维温、压、风和水汽含量的估计值。随着数字处理、计算机等技术的发展，为多普勒天气雷达的研制创造了条件，美国在 80 年代初开始设计能应用于实际气象业务的多普勒天气雷达，称为下一代雷达 (NEXTRAD)。并于 80 年代末定型生产，型号为

WSR-88D，于 90 年代中期完成了全国布网，投入业务使用<sup>[3]</sup>。该型号天气雷达反映了 20 世纪末的世界先进水平。图 1 为新一代多普勒天气雷达工作流程示意框图。

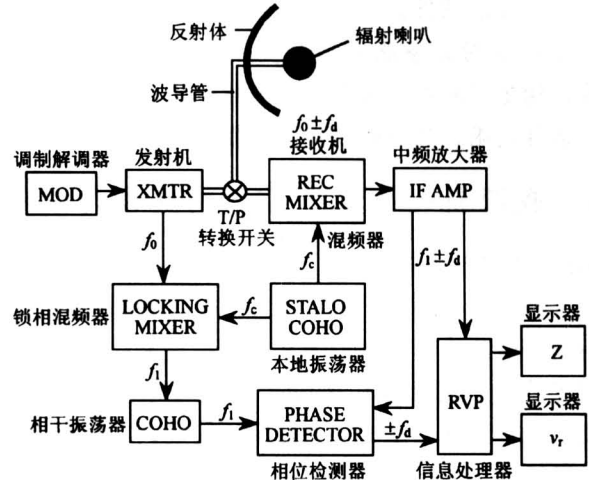


图 1 新一代多普勒天气雷达工作流程示意框图

Fig.1 Working diagram of new generation Doppler weather radar

我国目前开始建设的新一代多普勒天气雷达的主要技术指标基本上是以 WSR-88D 为基础制定的。其总体性能主要包括如下一些方面：

1) 基本探测能力 对台风、暴雨等大范围降水天气系统的监测距离  $> 400$  km；对雹云、龙卷、气旋等小尺度强天气现象的有效监测和识别距离  $> 150$  km。雷达探测能力在 200 km 处测到的最小回波强度在 S 波段  $< -7$  dBz，在 C 波段  $< -3$  dBz。

2) 定量探测性能 具有稳定的发射、接收系统，对数接收机要具有 100 dB 左右的宽动态范围，以应对降水回波功率进行较准确的定量测量。结合少量地面雨量监测站网，能对 200 km 半径范围内的降水量分布和区域降水量进行比较准确的估测。此外，还应具有对雷达主要性能参数进行监测、标校、故障报警的功能及地物消除能力。

3) 测速能力 采用高频率稳定度的相干发射、接收系统，具有良好的多普勒测速能力，能获取降水区内较准确的径向风场分布信息。在夏季湿润季节，应能探测到 100 km 左右范围内的晴空大气径向风场分布。通过选择合适的脉冲重复频率及速度褪模糊方法，能满足测距范围和测距区间的双重要求。

4) 软件及信息处理功能 具有丰富的应用软件对获取的探测信息进行实时综合处理。包括对冰雹、龙卷、飏线、强风切变、下击暴流等灾害性天气进行自动识别、追踪的能力,以及丰富的分析、处理、显示软件。

5) 实时业务能力 系统在数据格式、网络传输、稳定可靠性、元器件标准化等方面满足一般业务条件要求,具有较强的适应性。

## 4 我国新一代天气雷达网建设与应用

### 4.1 计划与进展

考虑到不同波长的雷达对不同降雨探测的能力不同,以及建设成本等因素,中国气象局计划在全国建设由S波段和C波段共同组成的新一代多普勒天气雷达网,由120多部雷达组成,其分布情况见彩插图1。图中红颜色圆点表示S波段雷达,约60部,主要分布在暴雨发生比较频繁的中部、东部地区。蓝色方块表示C波段,60~70部,主要分布在西部和北部地区。建设完成后,基本上可以形成覆盖我国中部、东部大部地区的雷达监测网,对灾害性天气的监测能力将会有显著提高。

到2002年底,已有近50部新一代多普勒雷达可以建成,这些雷达目前主要建在华东和华南沿海、长江流域及西部一些地区。预计“十五”期间可以完成整个计划的绝大部分建设任务,将有100部左右的新一代多普勒天气雷达投入实际气象业务应用。

彩插图2显示的是我国目前已建成部分的新一代多普勒天气雷达。这些雷达从1999年开始已陆续在业务中使用,成为我国气象业务现代化的标志性进展之一。

### 4.2 已建成雷达在业务与科研中的应用

目前在上海、安徽、湖北、湖南、江西、福建、广东等省市对已建设完成的雷达在实际业务中已开始发挥作用。特别是对一些强灾害天气的监测十分有效。

2000年安徽合肥多普勒雷达正式在业务中使用,在夏季汛期发挥了很好的效果。如6月1日到3日,江淮流域发生了一次特大暴雨过程。大范围的监测可以利用卫星云图。但对暴雨区一些强对流系统的三维结构,包括风场分布,只有通过多普勒雷达才能发现。彩插图3是利用合肥雷达探测到的风场分布图。彩插图3A(22时)上的箭头a所指

的橘黄色区域存在着西南分量的气流,而箭头b所指的灰白色区域存在着东南分量气流。在两个区域的交界处为切变线存在的区域,也就是辐合线存在的区域。彩插图3B(23时)辐合区进一步加强,并可以发现小块绿色区域,出现东北气流,说明有小尺度涡旋发生。此时正是安徽全椒县出现特大暴雨的时间,2h降雨175mm,14h降雨335mm。

彩插图4是在彩插图3B涡旋处做的剖面图。彩插图4A是风场剖面,可以看到对流层中低层气流辐合情况,特别是低层黄绿相交处为最大辐合区。彩插图4B是风场辐合示意图。彩插图4C为回波图,显示出辐合区云雨强度。彩插图4D为剖面位置示意图,黄线为此剖面的具体位置,箭头表示涡旋流场。

2001年台风“百合”于16日23时前后在台湾省宜兰附近登陆,中心最大风速40m/s。登陆后强度逐渐减弱,18日20时进入台湾海峡,19日02时减弱成为低气压。20日01时又发展成热带风暴,随后迅速加强,到20日10时30分登陆广东省惠来市时已经成为台风,中心最大风速36m/s。龙岩天气雷达很好地观测了“百合”从低气压发展成台风,到减弱及再加强的全过程,为对这次台风的成功监测和预报发挥了重要作用。

1998年我国发生了特大洪涝灾害后,国家科技部正式批准将“我国重大气候和天气灾害的形成机理和预测理论研究”列为“九七三”国家重点基础研究发展规划项目。该项目的目标是建立具有中国特色的强暴雨系统的中尺度物理模型和预报理论,使我国在重大天气灾害的机理和预测理论上达到国际先进水平。其重点研究内容之一是开展大规模外场加密观测试验,从而获取高质量的实况资料。

我国已建成的新一代多普勒雷达自然成为该项目的重点依靠手段。同时,如何将多普勒雷达探测信息有效应用到实际业务中,也是雷达建设中急需解决的问题。彩插图5是该项目外场观测试验时新一代多普勒天气雷达布网示意图。可以看到利用10部雷达基本上可以覆盖长江中下游地区。

在该课题研究中,试验开发了双多普勒雷达的二维风场获取算法,并取得了初步结果,见彩插图6。该图是利用安徽合肥和马鞍山两部多普勒雷达资料反演出的二维风场,从图中可以看出基本的中尺度风场结构。

## 5 天气雷达网建设中需关注的几个问题

### 5.1 站址选择

雷达站址的选择是建设过程中不可忽视的一个重要内容。站址选择不当, 会极大影响探测效果, 甚至使雷达不能正常工作。在雷达选址过程中, 一般应注意如下一些问题: a. 遮挡问题, 在雷达探测范围内要尽量避免山峰、高大建筑物的遮挡; b. 频率干扰问题, 要避免雷达站附近有与雷达发射频率相同或相近的无线电发射源存在, 以防相互干扰; c. 注意站址周围的基础设施条件, 如水、电、路等问题, 这些对于雷达的正常运行会有很大影响。站址选择涉及到许多复杂的技术和协调工作, 要妥善处理好。

### 5.2 产品和软件开发

新一代多普勒天气雷达提供的三种最基本产品是基本回波强度、径向速度和速度谱宽。通过这些基本产品结合数学算法和图形显示技术, 可以进一步开发出基本衍生产品, 如平面位置显示图像(PPI)、距离-高度显示图像(RHI)、等高面位置显示图像(CAPPI)、PPI 径向速度显示图像、云回波顶和回波底高度显示图像(ETPPI、EBPPI)等。在这些衍生产品的基础上, 又可以通过多种算法结合得到大量应用产品, 如垂直积分液态水(VIL)、速度方位显示(VAD)、龙卷涡旋特征(TVS)、冰雹指数(HI)等。在实际业务应用中, 一般雷达生产单位都可以提供基本和基本衍生产品。对于应用产品, 则有很大差别, 这也是各应用单位要根据实际需求进一步做工作之处, 有较广阔的发展空间。

### 5.3 组网

雷达业务组网是新一代雷达建设的一个重要环节。只有通过组网, 才有可能监测到完整的天气系统, 充分发挥每一部雷达的作用。雷达组网要与信息网络系统的建设、软件开发、数据格式标准制定、资料分析应用和服务系统相结合, 从而实现多部雷达信息拼图应用的最佳效果。

### 5.4 定位定标

影响雷达探测信息应用的一个重要因素是定位定标精度。定位不准, 既影响判断天气系统的准确位置, 也无法实现多部雷达的拼图效果。定标不准, 会使得获取到的雷达参数缺乏可靠性, 无法反

演成各种准确的基本气象要素。这两项指标应作为雷达生产和日常业务运行的重要检测对象, 发现问题要及时订正, 确保雷达获取信息的准确、有效。

### 5.5 褪模糊

多普勒天气雷达在探测目标物的距离和速度时会发生折叠或模糊。距离模糊的产生是由于在测距时, 目标物距雷达天线的距离, 是从探测脉冲发射开始计时, 直至雷达收到返回信号时的时间差乘以电磁波传播速度并除以 2。这里包含着一个假设, 即所收到的回波信号是从刚发射出去的脉冲返回的, 然而实际上不一定对。由于雷达要连续发射脉冲, 若有一个目标物离雷达比较遥远, 远到它的回波要在下一个脉冲发射之后才能回到雷达天线并被接收。这就会在一定远处形成第二个回波区, 因第二个脉冲在近处探测到的目标回波有可能与第一个脉冲回波同时返回并被接收, 使得一个回波信号不能被确定为是属于哪一个特定脉冲的, 从而产生了距离模糊。所谓一定远处可认为是在最大不模糊距离以外。可定义最大不模糊距离( $R_{\max}$ )为前一个脉冲在下一个脉冲发出前能向前走并返回雷达的最长距离,

$$R_{\max} = \frac{c}{2f_{\text{pr}}}$$

$c$  为光速,  $f_{\text{pr}}$  为脉冲重复频率, 分母乘 2 是因为要考虑脉冲从雷达到探测目标再返回所需要的时间。上式的实际含义是:

最大不模糊距离 = 脉冲传播速度 × 脉冲重复周期 ( $T_{\text{pr}} = 1/f_{\text{pr}}$ )。

此外, 多普勒天气雷达还存在最大不模糊速度。最大不模糊速度是指雷达能够不模糊地测量到最大平均径向速度。多普勒雷达测风是通过获取多普勒频移  $f_d$  得以实现的。而  $f_d$  的测定是根据相继 2 个返回的脉冲对的相位变化来确定, 相位变化是由于目标物的移动引起的。获取到脉冲对相位变化后, 就可以确定目标物的径向移动速度。移动速度趋向雷达时, 速度为负, 远离雷达时, 速度为正, 相应的位相差也有正负之分。由于相位变化是以  $2\pi$  为周期的, 一旦相位差超过  $\pm\pi$ , 就会误认为目标物向相反的方向移动。因此, 最大可分辨位相差为  $\pm\pi$ , 所对应的速度为最大不模糊速度

$$v_{\max} = \pm \frac{\lambda f_{\text{pr}}}{4}$$

$\lambda$  为波长。

从最大不模糊速度和最大不模糊距离的表达式

可以看出,增加或减少  $f_{pr}$ ,会使最大不模糊速度和最大不模糊距离反向增减,也就是出现了多普勒两难问题(Doppler dilemma)。因此,采用唯一的  $f_{pr}$ ,是无法同时减轻速度和距离的模糊问题。为了解决这一问题,目前可采取两种办法:一是通过对模糊距离和模糊速度的特征进行一定的技术判定后,用软件进行处理,可以达到一定效果。另一种方法是采用双  $f_{pr}$  进行探测,解决多普勒两难问题。目前在实际业务中,这两种方法都在使用。

### 5.6 数值模式应用

一般来说,天气雷达比较适用于短时强天气系统的监测和预测,时效为几个小时。如何延长雷达探测信息的应用时效,一直受到气象学家的关注,许多人做了大量工作。其重点之一是将雷达产品同化到数值预报模式中去。如能解决好这一问题,天气雷达产品的使用时效将会得到显著延长,可达10 h以上。为了达到这一目的,目前主要是针对多普勒天气雷达探测到的风场信息做工作,将1公里到几公里的数字化风场信息用到模式中,除能延长雷达资料的使用时效外,还能在模式中加入一般天气观测网资料所不能反映的中小尺度天气信息。这项工作的难点是如何将多普勒雷达探测到的径向风场反演成二维或三维风场。目前采取的方案主要有两种:一是直接利用单部多普勒雷达风场资料做工作,通过做某些假定后推算出二维风场;二是利用2部或多部多普勒雷达组网,对于某一点的风向风速可以从2个或多个角度获取信息,从而确定二维或三维风场。利用单多普勒雷达获取二维风场在技术上有一定难度,需做出一些假定和技术处理。目前已发展出多种方案。如60年代Lhermitte和Atlas等人提出<sup>[4]</sup>、后由Browning和Wexler等人进一步完善的VAD方法,目前已广泛用于气象业务中。除此之外,Easterbrook提出的VARD方法<sup>[5]</sup>、Waldteufel和Carbin提出的VVP方法<sup>[6]</sup>、Srivastava提出的EVAD方法<sup>[7]</sup>、陶祖钰提出的VAP方法<sup>[8]</sup>、Sun等人提出的四维同化(SDPR)方法<sup>[9]</sup>、邱崇践等人的最优控制(CTRL)方法<sup>[10]</sup>等。利用双(多)多普勒雷达组网获取大气二维或三维风场在理论上是可行的,在技术上还需根据实际情况确定具体可行的方案。但由于要求组网雷达相互间距离较近( $<100$  km),在大范围使用上会受到限制。因此,从科研角度,采用双(多)多普勒雷达组网方案比较理想,但作为大范

围业务组网,仍应继续完善和探索通过单多普勒雷达获取二维风场信息的实用方法。

图2为双多普勒雷达探测风场示意图,通过两部布设相近的雷达,将获取到的资料按一定算法进行处理后,可以获得探测共同覆盖区的部分空间二维风场。从雷达资料在实际业务中应用的效果看,特别是对于在数值预报模式中的应用,还需要根据这些资料的特点,进一步研究并建立有效的四维同化方法,使雷达探测资料能与其他资料有效结合,充分发挥作用。

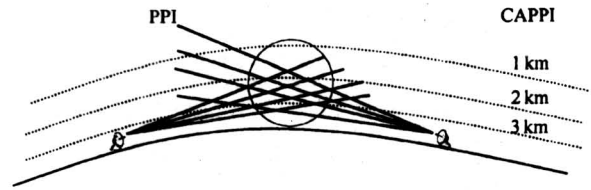


图2 双多普勒雷达探测风场示意图

Fig.2 Sketch chart of detecting velocity by dual-Doppler radars

## 6 未来天气雷达技术发展的若干领域

### 6.1 双偏振雷达

为了识别降水目标、区分不同的降水类型,人们采用多参数雷达进行天气研究,其中双、多偏振雷达是人们常采用的技术之一。它根据不同的降水粒子对入射电磁波极化散射特性不同来区分降水,从而达到对降水类型的识别和分类。根据双偏振天气雷达发射水平和垂直极化的电磁波、接收极化回波、测量雷达的反射率因子  $Z_H$ 、反射率差  $Z_{DR}$ 、传播相移差、相关系数  $\rho_{HV}(0)$  和退极化比  $R_{LD}$ ,可估算出降水粒子的形状、尺寸和指向角的分布情况,进行降水型的分类和识别。对降水过程,粒子的状态信息及降水的热力学和动力学结构的描述更加详尽。彩插图7是美国大气研究中心(NCAR)用双偏振多普勒雷达探测到的积雨云中的不同降水性质的信息。图中不同颜色表示不同雨水、雪、冰晶等在云中不同位置的分布情况。

美国国家天气局已将双偏振技术的使用作为下一步对新一代天气雷达进行更新改造的重要内容。我国的科技人员目前也已基本上掌握了双偏振雷达的技术,并已有少量这样的雷达在业务中应用。

### 6.2 双基或多基雷达

双基地雷达是指发射和接收分别用2个天线的雷达系统。双(多)基地雷达主要是相对于比较常

见的单基地雷达而言的，它实际上早在单基地雷达发展前几年就已经出现了，在美、英、法、德和前苏联等国家，最早的实验雷达都是双基地雷达。后来由于单基地雷达结构简单，逐渐成为实用雷达的主流，而双（多）基地体制则受到了人们的冷落。直到1950年以后，由于东西方军事集团的军备竞赛，特别是近年来，随着“四大威胁”即目标隐身技术、综合性电子干扰技术、低空超低空突防技术和反辐射导弹技术的迅猛发展，才使双（多）基地雷达又重新获得重视。在民用领域，双（多）基地雷达的应用也很广泛，例如，近距离高分辨成像、机场场面监视、行星表面和环境测量、地质探测、洋面波谱测量、对流层/电离层/大气目标的探测等等。美国NCAR（美国大气研究中心）在1993年进行了双基地雷达应用于风场测量的实验，获得了成功并推广这一成果。彩插图8为美国NCAR用双基多普勒雷达获取的二维风场资料。

日本与中国气象科学研究院联合开展“长江流域梅雨峰暴雨”的探测与气象研究，先后两次在长江下游一带布置双/多接收站。而国内目前在双基气象雷达系统这一领域的研究刚刚起步，中国气象局与有关研究单位正在进行合作研究、开发，目前还没有应用于气象业务的产品。为了能在几十公里范围内有效获取高分辨大气二维或三维风场，双（多）基气象雷达系统有可能成为一个重要手段。

### 6.3 相控阵雷达

目前美国业务上使用的和我国将布设的新一代多普勒天气雷达的体扫周期需要5~10 min，对于一般的天气系统够用了。但也有一些小尺度强天气系统的生命周期只有几分钟到几十分钟，如龙卷风、下击暴流等。对于这样的天气系统，最好能用相控阵多普勒天气雷达。现有的天气雷达大部分是利用天线扫描的方法完成立体扫描的，而相控阵雷达是用天线的旋转完成水平扫描，用相控阵的方法完成垂直扫描。美国海洋大气局（NOAA）的强风暴雨实验室（NSSL）用军舰上的AN/SPY-1A相控阵雷达进行天气探测实验，并由此得出相控阵雷达的空域扫描周期 $\leq 1$  min；当与先进的算法相结合时，对危险气象的预警时效可达到22 min，这大大改善了对天气现象的探测质量和进一步增加了对灾害天气的预警时间。为此，NSSL已和美海军、洛克西德-马丁公司、Oklahoma大学的电子工程系和气象学院、美联邦航空局（FAA）等单位合作

在Norman建立了相控阵天气雷达试验站，耗资2500万美元。该系统将于2003年启用。我国一些研究院所也在进行这方面的开发和研究，但目前还没有在业务上使用的计划。

### 6.4 激光雷达

1960年世界上第一台激光器问世之后，激光技术被迅速地应用于大气探测。1963年美国斯坦福研究所研制成应用于对流层大气探测的激光雷达，随后受到世界各国的重视<sup>[11]</sup>。由于激光雷达探测波长较短，便于应用于一些特殊的探测领域。主要有大气光学参数和能见度探测，气溶胶和烟羽探测，风和湍流探测，大气气体成分浓度和分布探测等。目前，一些发达国家和中国都具备了生产激光雷达的能力。

### 6.5 风廓线雷达

风廓线雷达是一种用来测量从近地面到高空的风向、风速垂直分布的仪器。它以微波遥感的方式连续测风，获得大气晴空风场的三维数据，弥补了常规高空风探测中时空密度不够的缺点。其原理是<sup>[12]</sup>：当垂直向空中发射一束无线电波时，由于大气温度和湿度的湍流脉动，大气折射指数产生相应的涨落，会使雷达波束的电磁信号被散射，其后向散射将产生一定功率的回波信号。风廓线雷达就是通过接收处理这些回波信号来获取风场信息的。如果在其上附加无线电声学探测系统（RASS）还可连续获得低层大气的温度廓线。通过风廓线仪雷达的组网观测，可以提高常规要素观测的时空密度，也可以提高数值预报初始场的质量。

### 6.6 机载和卫星雷达

利用机载多普勒雷达可以更加灵活地探测到强对流天气的发生发展情况。目前国内外都已掌握了这项技术。由于价格相对昂贵，一般只应用于科学试验，具有灵活性和针对性等特点。1993年法、英的一项大气合作项目（FASTEX），着眼于温带气旋及其造成的暴雨系统，重点解决气旋生成理论、可预报性、中尺度云系统和海-气相互作用等问题的研究。彩插图9为FASTEX试验期间利用机载多普勒雷达探测到云剖面图，不同阴影表示降水强度，箭头为风向和风速。

另一项雷达探测技术是在卫星平台上搭载雷达探测器，从空间向下探测大气结构。其优点是较地面雷达探测范围大，通过主动发射电磁波的方式可以探测到天气系统的内部结构。特别是在对发生在

广阔海洋地区的天气系统进行监测时具有明显优势,可以对发生在海洋上的台风、温带气旋等天气系统进行有效监测。1997年美国和日本联合研制并发射了一颗热带测雨卫星 TRMM,在该卫星上装载了由日本研制的测雨雷达(PR)。该雷达的工作波长为 2.17 cm,峰值功率 500 W,扫描角度为  $\pm 17.0^\circ$ ,扫描宽度为 220 km,星下点水平分辨率为 4.3 km,垂直分辨率为 250 m。通过该雷达的资料可以获取丰富的降水信息。彩插图 10 为 1998 年我国发生特大持续性暴雨期间利用 TRMM 卫星雷达探测器得到的资料分析出的降雨云系结构图。

总之,雷达是对天气系统进行探测的有效工具。在我国,通过新一代多普勒天气雷达网的建设可以显著提高灾害性天气的监测预测能力。特别是,在配套软件、通信网络系统、应用产品开发都能发展到位的条件下,雷达建设的减灾防灾效益将能得到充分发挥。

#### 参考文献

- [1] 阮均石. 气象灾害十讲 [M]. 北京: 气象出版社, 2000
- [2] 张培昌. 雷达气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 2001
- [3] 编写组. 新一代天气雷达培训教学参考资料——WSR-88D 教程 [M]. 北京: 中国气象局培训中心科学技术培训部, 2000
- [4] Lhermitte, Atlas D. Precipitation motion by pulse Doppler [A]. Preprints Ninth Weather Radar Conf [C]. Amer Meteor Soc, 1961. 218~223
- [5] Easterbrook C C. Estimating horizontal wind fields by two dimensional curve fitting of single Doppler radar measurements [A]. Preprints 16th Radar Meteorology Conf [C]. 1975. 214~219
- [6] Waldteufel P, Carbin H. On the analysis of single Doppler data [J]. J Appl Meteor, 1979, 18: 532~542.
- [7] Srivastava. Doppler radar study of the trailing anvil region associated with a squall line [J]. J Atmos Sci, 1986, 43: 356~377
- [8] 陶祖钰. 从单多普勒速度场反演风场的 VVP 方法 [J]. 气象学报, 1992, 50 (1): 81~90
- [9] Sun J Z, Flicker D W, Lilly D K, Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from simulated single-Doppler radar data [J]. J Atmos Sci, 1991, 48 (6): 876~890
- [10] Qiu C J, Xu Q. A simple adjoint method of wind analysis for single-Doppler data [J]. J Atmos & Oceanic Tech, 1992, 9 (5): 588~598
- [11] 周秀骥. 高等大气物理学 [M]. 北京: 气象出版社, 1991
- [12] 张霭琛. 现代气象观测 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2000

## Construction, Techniques and Application of New Generation Doppler Weather Radar Network in China

Xu Xiaofeng

(China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

[Abstract] New generation Doppler weather radar (NEXTRAD) has become one of the most important tools for monitoring and forecasting severe weather. It has been widely used in some developed countries. China's NEXTRAD network has been constructed since 1998, and the project is supported by national debt. The techniques in NEXTRAD development are described in this article, including the situation of construction and application in China, some problems that should be carefully considered in construction and several new fields of radar techniques in weather monitoring in future.

[Key words] Doppler weather radar; technical analysis; construction; application; future development