

14
P415.2
14

NEXRAD

NEXRAD

下一代天气雷达

NEXRAD

NEXRAD

NEXRAD

NEXRAD

NEXRAD

NEXRAD

NEXRAD

气象科学研究院

内 容 简 介

本文集内容有,先进的多普勒天气雷达系统和美国将使用的下一代天气雷达(NEXRAD)的详细介绍,多普勒天气雷达探测资料在强风暴业务预报和警报中的应用,以及下一代天气雷达在军航、民航、水利和公众服务中的潜在能力等。可供有关研究与应用单位、院校和技术发展部门参考。

下一代天气雷达

气象科学研究院雷达气象室编

*

责任编辑 《气象科技》编辑部

北京昌平百善印刷厂印刷

*

成本费3.60元

前 言

早在六十年代初,美国就开始了多普勒技术在天气雷达中应用的研究,在一些研究单位和实验室先后研制了多普勒天气雷达,并用于对强对流天气的探测、云雾物理研究及灾害性天气警报和短时预报试验,取得很大成绩。随着电子技术的发展,尤其是计算机的普遍使用,多普勒天气雷达能获取的大量信息,可以得到及时的收集、处理和显示,为它在气象业务工作中应用提供了可能。1977—1979年期间,美国为了鉴定多普勒天气雷达在业务工作中的能力,实施了联合多普勒雷达业务计划(JDOP),其结果是肯定的,随后制定了下一代天气雷达(NEXRAD)的计划。

下一代天气雷达将是由多普勒天气雷达和强功能的计算机组成的结合体。多普勒天气雷达除能提供降水的强度信息外,还可获取降水区中气流运动的信息,并有可能获取晴空状况下边界层中气流结构的信息等。强功能的计算机可以近于实时地收集、处理数据,给出便于用户应用的多种产品。这种新型的天气雷达系统将在九十年代由美国国家天气局、美国空军、联邦航空局等部门采购、建站,替换现有的天气雷达设备,组成新的天气雷达网。

多普勒天气雷达是一种非常有用的探测工具,与其他探测设备配合,有可能大大改善目前对强对流天气的警戒和短时预报。国内也正在计划逐步开展多普勒天气雷达方面的研究、应用工作。多普勒天气雷达的探测理论、分析技术和使用方法,与常规天气雷达相比,更为复杂。为了适应发展的需要,我们组织翻译了一组有关多普勒天气雷达及下一代天气雷达的近期文章,供有关的研究单位、院校及技术发展单位人员参考。译文除特别标明出处的以外都选自*Proceeding of NEXRAD Doppler Radar Symposium/Workshop 1982*。

整个译文集的翻译工作由气象科学研究院雷达气象室承担,译稿最后由葛润生等同志进行统一的协调。尽管如此,由于译文涉及的领域较宽,知识比较新,肯定有不恰当之处,欢迎批评指正。

编 者

一九八四年十二月

目 录

美国下一代天气雷达计划	(1)
联合多普勒雷达业务计划 (JDOP) 的结果	(6)
单部多普勒雷达观测资料在预报和警报中的应用	(17)
作为强风暴预报指标的单部多普勒雷达速度标志	(32)
单部多普勒雷达在雷暴发展之前的观测	(41)
应用下一代雷达探测飓风对流雨带的组织和结构	(46)
横向运动及冰雹的探测	(55)
雷达测量降水	(61)
对于脉冲多普勒雷达探测强雷暴的考虑	(71)
双多普勒雷达和VAD分析得到的次天气尺度垂直风	(86)
双多普勒雷达对行星边界层晴空风扰动的观测	(95)
多普勒天气雷达	(102)
NEXRAD的雷达分系统研究	(143)
实时处理	(156)
多普勒雷达对国家天气局监视和警报工作的潜在影响	(163)
空军天气局对雷达设备的需求	(172)
NEXRAD应用于航空天气问题	(179)
强雷暴与公众：我们做的事情对吗？	(182)

美国下一代天气雷达计划

葛润生 马大安

目前美国天气雷达网所使用的雷达主要还是二十多年前设计制造的 *WSR-57* 10 厘米常规天气雷达。虽然就目前的天气雷达技术水平来看, *WSR-57* 雷达主机的性能参数还是相当不错的,且在布站使用后的二十多年里,雷达陆续配备了一些新的装置,如视频积分处理器、远距离图象传送设备、附加照相系统等,提高了雷达的使用能力,但 *WSR-57* 雷达面临一个较重大的问题,就是雷达设备的维修和配件的供应问题。*WSR-57* 雷达主机是以电子管为主体的设备,二十多年来,电子器件发展非常迅速,一些老的器件已不再生产,再过数年将无法保证 *WSR-57* 雷达的维修和正常工作,这就迫使天气雷达的更新问题提到日程上来。另一方面,在过去的二十多年间,天气雷达探测技术发展很快,特别是多普勒天气雷达技术,已由科研上使用进展到可以供业务工作使用,更新的天气雷达必须考虑新技术的应用。美国在七十年代中期已在考虑下一代天气雷达的问题,经过数字化天气雷达试验、联合多普勒雷达业务计划 (*JDOP*) 试验后,到1979年正式形成了下一代天气雷达 (*NEXRAD*) 计划,计划到九十年代,将用下一代天气雷达替换 *WSR-57* 雷达,布站使用。下一代天气雷达预计将延用到二十一世纪。

一、NEXRAD计划的形成

七十年代初,美国国家天气局(*NWS*) 将已经发展的天气雷达与小型计算机联接,用计算机对天气雷达回波数据进行处理,在

堪萨斯城等四个 *WSR-57* 天气雷达站进行了数字化天气雷达系统的业务工作试验,其目的是发展一套数字处理天气雷达资料的技术,以供对强对流天气警戒和洪水预报应用,同时也是对下一代天气雷达的设想进行探索。在这同一时期,多普勒天气雷达技术上有一重大突破,就是对相干信号进行处理的脉冲对处理技术的出现,它使得多普勒天气雷达回波信息可以实时地提取和处理,解决了多普勒天气雷达业务工作使用的问题。这样,下一代天气雷达有可能选用多普勒体制,并和计算机处理系统相联接,成为完善的对强对流天气探测和警戒系统。

虽然多普勒天气雷达在一些探测试验和研究工作中显示了巨大的能力,但究竟在业务工作中使用效果如何呢,这是非常重要的,这也将涉及到在下一代天气雷达中采用不采用多普勒体制的问题。为此目的,*NWS*、联邦航空局 (*FAA*)、美国空军天气局 (*AWSS*)、国家强风暴实验室 (*NSSL*) 和空军地球物理实验室 (*AFGL*) 在俄克拉何马地区进行了为期三年的联合多普勒雷达业务计划 (*JDOP*) 试验。在1977年到1979年间,使用 *NSSL* 的10厘米多普勒天气雷达、*AFGL* 的5厘米多普勒天气雷达,与 *NWS* 的 *WSR-57* 雷达及空军 *FPS-77* 雷达进行业务工作的比较试验。试验结果对多普勒天气雷达作了肯定的结论,多普勒天气雷达不仅对龙卷有较好的识别能力和较长的预警时间,对冰雹和强风的探测也有较好的结果。关于多普勒雷达和常规天气雷达对龙卷、冰雹和强风

探测的比较结果可参见本集《联合多普勒雷达业务计划 (JDOP) 的结果》一文中表 1。通过 JDOP 试验证明, 下一代天气雷达若采用多普勒体制, 将提高对强对流天气的判别和警报能力。

1979年 JDOP 试验结束后, 美国国会下的一个与气象工作和研究有关的工作小组, 根据 JDOP 的结果, 在 1979年 7 月提出一份关于下一代天气雷达 (NEXRAD) 的报告, 报告推荐美国国家天气局 (NWS)、空军天气局 (AFWS)、联邦航空局 (FAA) 之间相互协调, 筹建一个新的国家天气雷达网, 即 NEXRAD。1979年 8 月, 这三个局组成了一个联合办公室, 称为系统发展联合办公室 (JSPO), 具体负责 NEXRAD 事务, 办公室设在 NWS 下。JSPO 的具体工作则由以下的四个单位给予支持。

1. 内部业务测试实验室 (IOTF), 它是 JSPO 的直属单位, 属于 NWS。这个单位目前设在俄克拉何马州的请曼, 与 NSSL 在同一栋楼里, 主要承担了对 NEXRAD 系统进行测试和操作方法的研究任务。目前, 在 NEXRAD 的雷达主机设备尚未完成前, IOTF 主要是对已经发展的应用软件在 NSSL 的多普勒天气雷达上及 AFGL 的多普勒天气雷达上进行测试和检验, 并组织发展新的多普勒雷达资料处理的应用软件。

2. NSSL, 它是美国最早发展 10 厘米多普勒天气雷达的单位。NEXRAD 系统的雷达主机的一些主要性能指标主要参考了它的 NRO 多普勒雷达, 研制的 NEXRAD 主机的一些主要部件将在这里进行测试, 整机制作后也将在这里进行考验。同时, NSSL 还承担了一些 NEXRAD 系统的应用软件制作工作。

3. AFGL, 它也是美国多普勒天气雷达研究工作开展得较早较好的单位, 尤其是在雷达主机与计算机联结、处理方面做得比较

好。研制的 NEXRAD 设备也将在这里进行测试, 它也承担了部分软件工作。AFGL 设在美国东北部地区的马萨诸塞州, NSSL 在美国的中南部地区, 在这两个实验室对 NEXRAD 系统测试, 有其代表意义。

4. 环境研究院 (ERL) 的地区性观测和预报系统 (PROFS) 也是 NEXRAD 系统的支持者。在 PROFS 中天气雷达探测资料的处理、应用是其一项重要的内容。NEXRAD 系统是未来的布网天气雷达, NEXRAD 系统的应用及与其他探测资料配合进行地区性的预报和警报将是 PROFS 所要考虑和研究的问题。

NEXRAD 系统将采用招标的方法由美国大的电子企业公司制作, 而系统的总体要求、设备测试及应用软件的发展则是由上述的单位承担。整个 NEXRAD 系统将由两个大的子系统组成: (1) 雷达资料收集系统, 也就是硬件部分, 它包括了多普勒体制的雷达主机、实时处理器, 及计算机处理系统; (2) 产品生成子系统, 也就是软件部分, 主要是 NEXRAD 的实时产品和间接产品、实时的 PPI、RHI 处理软件和 25 个间接产品软件。

二、NEXRAD 的设备性能

根据 JSPO 的要求规定, NEXRAD 将以脉冲多普勒天气雷达为主体, 通过通讯网络与资料处理终端联接, 而形成一个完整的设备系统。由于 NEXRAD 将面对多种用户——NWS、FAA、美国国防部 (DOD), 因此, 为了适应用户的要求, 它的某些分系统可以做性能上的切换和选用。NEXRAD 系统的设计方案目前尚未公开, 但 NEXRAD 系统雷达主机的性能参数是已确定的, NEXRAD 系统的一些主要设备也是基本确定的。图 1 是 NEXRAD 简化系统方框图。NEXRAD 系统可以划分为

雷达收发、信号处理和计算机终端三个分系统。

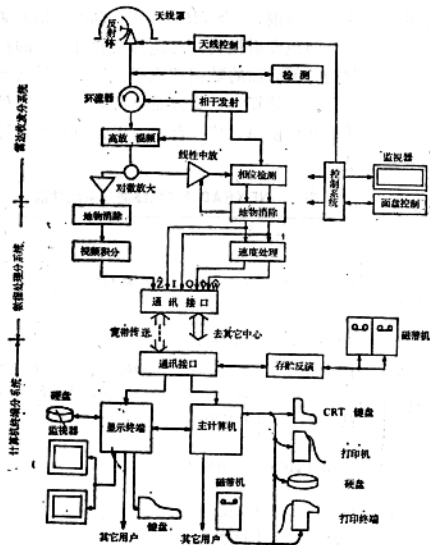


图 1

1. 雷达收发分系统是全相干式的脉冲多普勒雷达, 它由相干发射机、天线、天线自动扫描程序控制器、低噪预放和变频器、强度测量通道的对数中频放大器、多普勒测量通道的线性中频放大器和相位检测器以及系统的检测单元等组成。收发机具有很高的频率稳定性和系统的相干性, 以满足多普勒测速的精度要求。天线控制器可在选定的模式

下, 控制天线做多种类型的扫描。NEXRAD系统的基本性能参数由这一分系统决定。表 1 列出了NEXRAD的主要性能参数与WSR-57雷达的比较。

2. 信号处理分系统由地物杂波抑制器、数字视频积分处理器(DVIP)、脉冲对处理器(PPP)、数据通讯接口等几部分组成。在这个分系统中雷达主机送来的三路模拟信号, 首先都进行模数转换, 变成数字信号, 再进行处理。送入处理的数据和处理后的数据均保持在8—12bit字长的精度上, 处理过程中的字长可达16—20bit。整个信号处理分系统以“流水”式方式对数据进行实时处理, 数据通过率达到每秒1.2MB。NEXRAD主要采用PPP进行平均径向速度和谱宽的处理, 采用多极椭圆滤波器进行地物杂波的抑制。NEXRAD也可能同时采用FFT对多普勒信息进行处理, 尽管FFT在处理速度和数据量上不如PPP, 但它能提供全谱信息, 有一些独特的功能。NEXRAD的另一特点是配有很强的数据通讯系统, 除了Z、V、σ三要素信息, 还将系统控制、状态信息及多普勒原始数据——频移和强度的时间序列通过宽带

表 1 NEXRAD与WSR-57主要性能参数比较

	收发机类型	波长	峰值功率	波束宽度	脉冲宽度	脉冲重复频率	最小检测信号	定量测量范围	警戒范围	测速范围
NEXRAD	相干式	10cm	1MW	<1°	1 μs	800—1200Hz	10dBZ*	250km	450km**	±20—30m/s
WSR-57	非相干式	10cm	500kW	2°	1 μs	155Hz	15dBZ*	125海里	250海里	无

* 250km处的最小可测反射率因子

** 采用批式脉冲发射时

网络传送到不同的分析处理中心，再进行综合处理。表2给出NEXRAD数据处理分系统的性能。

表2 NEXRAD数据分系统的性能

视频分离器 (DVIP)		脉冲对处理器 (PPP)	
距离门宽	~500米	距离门宽	~150米
距离门数	最多1024	距离门数	最多1024
处理方式	算术平均或 指数加权	处理方式	复数协方差幅角和自相关函数估算
时间取样数	4-32	时间取样数	16-256
输出精度	<0.4dB	输出精度	<0.25米/秒
地物消除器		接口、通讯口	
处理方式	多极椭圆滤波 器	功能	数据标定、规格化
抑制比	约65dB		调制发射
截止点速度	约0.3米/秒	输入字长	1-8位
通带起始点	约1米/秒	输出字长	1-16位
纹波	<1dB	最大数据通过率	1.2MB/秒

不等间隔的批式脉冲发射模式可以扩大雷达警戒的范围，适合NWS应用。也可采用双频式等间距发射模式，对地物杂波有较好的抑制能力和略高的数据获取率，用于机场效果较好。在计算机系统方面也可采用多台微处理器联合使用代替一台能力很强的小型计算机。

表3 NEXRAD计算机终端分系统性能

实时显示终端	
图形处理器	16位CPU, 1MB RAM
分辨率	1024 × 1024
伪彩色分层	256/4096
图形处理软件	极坐标—X, Y坐标转换, 字符产生, 局部放大显示, 移动窗口, 游标操纵杆等
处理速度	40KB/秒
计算机终端 (集中处理方式)	
CPU	32位
内存	4MB
运算能力	1.2MIPS
外设备	打印终端 (标准) CRT终端 (标准) 硬盘 456MB 磁带机 800/1600bpi DMA与显示终端联结 硬拷贝

第三分系统是计算机终端分系统。它由通讯接口、资料在线记录和反演、计算机和外设，以及显示终端等单元组成。由通讯接口收到的预处理后的资料，将同时送到三个大的单元中去，计算机终端在NEXRAD的一套应用软件支持下，生成多种分析和预报产品，由显示终端显示，或由各种外设进行存贮或硬拷贝。显示终端单元具备各种图形处理的硬件和软件支持，如坐标转换、伪彩色、图形变换、符号生成和人机对话等功能。数据的在线记录和反演单元可以独立地把由接口来的规格化的资料实时无漏地存档，供事后反演或再处理。表3给出计算机分系统的主要性能。

在保证全系统主要性能的前提下，NEXRAD允许有不同的设计思路。如采用

三、NEXRAD的软件系统

NEXRAD系统除了雷达主机采用多普勒体制外，还有一个特点是系统配备了大量的应用软件。观测使用人员除了可以实时地获得回波强度Z、径向平均风速V和速度谱宽σ三要素的PPI和RHI彩色分布图象外，还可准实时地通过计算机对这三要素做进一步处理，得到多种适合业务工作使用的图象、表格及资料。

*NEXRAD*系统计划中配备的软件除了实时显示的软件及一些控制软件外,共有25个应用软件,大致可以划分为四类:

1. 降水分析技术

- a. 回波强度数据的预处理软件
- b. 降水强度校准软件
- c. 降水强度分布软件
- d. 降水量分布和小区域降水量分布软件
- e. 风暴降水总量软件
- f. 垂直累积含水量分布软件
- g. 洪水警报软件

2. 风资料分析技术

- a. 速度方位角显示 (*VAD*) 软件
- b. 速度体积处理 (*VVP*) 软件
- c. 风切变判别软件
- d. 横切风判别软件
- e. 阵风锋识别软件
- f. 湍流判别软件
- g. 辐散/辐合软件

3. 风暴结构及强风暴识别技术

- a. 等高平面位置显示 (*CAPPI*) 软件
- b. 回波顶高分布软件
- c. 风暴结构分析软件
- d. 中尺度气旋识别软件
- e. 冰雹识别软件
- f. 龙卷涡旋识别软件
- g. 强烈天气出现概率预测软件

4. 风暴追踪及预测技术

- a. 风暴单体划分软件
- b. 风暴中心轨迹软件
- c. 风暴追踪软件
- d. 风暴未来位置预测软件

除了上述已计划的25个应用软件外, *NEXRAD*系统还将根据用户的一些特殊要求,准备制作热带气旋分析软件、雷暴识别和分析软件、云中过冷水层和融化层识别和分析软件等。至于将*NEXRAD*系统提供的

资料与其他探测资料配合分析及进一步作天气预报的软件,则是*PROFS*系统未来考虑的工作,没有列入*NEXRAD*系统的计划内。

上述25个应用软件的制作是由*NWS*、*NSSL*、*AFGL*、国家大气研究中心(*NCAR*)等单位承担的。软件制作完成后需经过严格的检验。对软件的检验分为两种,一是用历史资料进行检验,主要应用*NSSL*和*AFGL*早期多普勒天气雷达探测积累的资料,另一方面将软件在实际的探测试验中进行检验。检验工作主要由*IOTF*承担。

四、*NEXRAD*计划执行的时刻表

*NEXRAD*计划是一项比较庞大的计划,预计需要投资二亿美元以上,系统设备要求的技术也比较高。这一计划的执行是比较细致和慎重的。从1979年*NEXRAD*计划办公室成立起到整个*NEXRAD*网站布设完成,预计要有13年,共分为四个阶段。第一阶段从1979年起至1982年12月,制定*NEXRAD*系统的总体要求方案,向美国三大电子企业公司招标,这三大公司是*Sperry*、*Westinghouse*和*Raytheon*。三大公司根据总体要求方案制作细致的设计方案,然后进行评选,选出其中两家公司来制作样机。这一阶段的工作已基本如期完成,在1983年3月确定由*Sperry*和*Raytheon*制作试验样机。第二阶段预计到1986年8月止,由两家公司生产试验样机中的各个分机,进行现场测试、检验,最后选定一家公司生产样机。第三阶段从1986年8月开始,少量生产*NEXRAD*系统进行布站使用,到1988年1月预计生产10部*NEXRAD*系统。第四阶段,从1988年开始大批量生产*NEXRAD*系统,到1992年将全部替换现用的*WSR-57*天气雷达,建成新的国家天气雷达网。

联合多普勒雷达业务计划(JDOP)的结果

R. J. Donaldson

D. W. Burgess

1. 前 言

自然界对即将来临的灾害常常给出相当的预兆,例如最具有破坏作用并威胁着生命安全的龙卷总是来自一大的母环流,叫作中尺度气旋。而这中尺度气旋在龙卷袭来之前的半小时或更长一点的时间内可以被多普勒雷达发现和识别出来。*Brooks*在1949年通过对龙卷附近的微气压计记录踪迹的研究发现了中尺度气旋。20多年后,*Donaldson*等人(1969)应用具有实时扫描能力的多普勒雷达(*Armstrong*和*Donaldson*, 1969)在一次严重的马萨诸塞州雷暴中发现了一个中尺度气旋。在此破坏性强风前,这个中尺度气旋在风暴云内从低到中层维持了一个小时。

其后几年来,*NSSL*(强风暴实验室)装备了高分辨率10厘米的多普勒雷达并在俄克拉何马州(*Ray*等人, 1979)观测到了许多中尺度气旋。*Burgess*(1976)及*Burgess*

等人(1979)把5年的观测作了一个小结,指出应用多普勒雷达作龙卷及强雷暴的业务警报有某些非常可取的特点。首先他注意到37次观测到的中尺度气旋几乎全部(95%)都导致了地面的灾害。总计有23次(占62%)与龙卷有关,12次与无龙卷的风灾和大冰雹有关。在收集资料期间,没有一次龙卷的发生不是有中尺度气旋为先导的。最后,在所有16个龙卷发生的准确时间都报告出来了的例子中,中尺度气旋超前于龙卷的时间范围从13分钟到多于1个小时,平均提前时间为36分钟。对于提前时间较少的几次,是由于中尺度气旋已经形成才开始收集资料。其中从中尺度气旋初生和龙卷触地的精确时间统计,平均和最小提前时间分别为42和23分钟。在公布这些统计数字时,民用及军事气象部门的官员都承认多普勒天气雷达在保障生命安全方面的潜力。

*Brown*和*Lemon*(1976)对*Burgess*^s(1976)调研的补充一文中与*Burgess*一道

能否如预期的那样进行,还将受到各方面因素的影响。

表4 NEXRAD系统的预分配方案

单位	NWS	FAA	DOD(AWS等)	贮存等	台计
数目	82	21	6	51	160

表5 NEXRAD系统生产计划

1986年	1988年	1989年	1990年	1991年	1992年
1	10	35	48	48	18

*NEXRAD*系统预计要生产160套,提供给*NWS*、*FAA*、*DOD*(*AWS*等)等部门使用,并有近1/3的系统作为储备等。具体的分配方案见表4。*NEXRAD*系统生产计划见表5。

*NEXRAD*计划是一项相当庞大的计划,对此计划的意见有褒有贬。好的看法是*NEXRAD*系统采用了非常先进的技术,将能适应下一世纪对天气雷达探测的要求。另一方面,有些人却怀疑花费如此巨大的费用制作这一系统是否值得。*NEXRAD*计划

在一个最大的龙卷(Burgess等人,1975a,b)中发现了龙卷涡旋标志(TVS)。TVS比典型的中尺度气旋要小得多而且强得多,并被认为是龙卷环流的直接征兆。就多普勒雷达对TVS的探测能力来说,与龙卷的大小和其强度比较起来,雷达波束宽度的分辨力起重要作用。TVS是相当少见的,由于许多小的龙卷,甚至大的龙卷在远距离上探测不到。然而,一旦探测到了,这TVS就肯定是一种“麻烦”的信号。从Brown与Lemon1976年所作的9次TVS探测中,7次与已证实的龙卷或漏斗云相联系,而其余2次还不能肯定。

与Burgess, Brown, Lemon和他们的同事们研究一致,天气预报界日益感到需要更换年久过时的业务天气雷达网。多普勒雷达的能力及其技术看来是可取的,但是价格昂贵,而且就业务运用来说尚未得到证明,很明显,需要作一次试验来决定多普勒雷达在改进风暴警报方面是否能胜任。因此,联合多普勒雷达业务计划(JDOP)应运而生。参与合作的机构有美国空军天气局(AWS)、国家天气局(NWS)和联邦航空局(FAA),并得到国家强风暴实验室(NSSL)和空军地球物理实验室(AFGL)在研究设备和人员上的大力支持。JDOP始于1977年春季的风暴季节到1979年末,在俄克拉何马州内进行的。

JDOP进行的头两年的详细报告已由Burgess等人撰写。最后一年的JDOP试验活动由Donaldson和Glover(1980)报道过。

2. 中尺度气旋的识别

多普勒雷达只能测定沿雷达成射线方向的速度,而对垂直于波束方向的运动就根本测不出来。扫描一个降水区域的多普勒雷达会

产生一个场,简单地叫“多普勒速度场”,它包含的并不是速度向量,而且速度向量沿雷达所指方向上的分量。因此从多普勒速度的标量场作出向量风场的判断需要有想象力,为了勾画出真正的风场,研究组有时要应用设置在不同地点的好几部多普勒雷达对同一地区进行扫描,但是由于业务工作中的天气预报员认为多于一部多普勒雷达的应用是奢侈行为而被否定了。

Donaldson(1970)根据气象学中的似乎合理(Plausibility)观点提出了中尺度气旋的识别问题。假如一个中尺度气旋出现了,从单个多普勒雷达的观点来看,它的图象特征将是速度值大致相同而符号相反的距离大致相同的一对多普勒速度极值,并为相当于在中尺度气旋中的最大旋转风直径的水平距离所隔开。图1中列出了几个例子。

由于对多普勒速度场在解释上的固有模糊性,有许许多多的风场都可以导致一对速度极值。因此Donaldson提出了一系列规则,若得到满足,这些规则就会大大地缩小与其他风场的相似性,而只有旋转的涡旋才会产生一对极值的图象特征。这些规则考虑了穿过这一对极值的切变强度(多普勒速度梯度)。

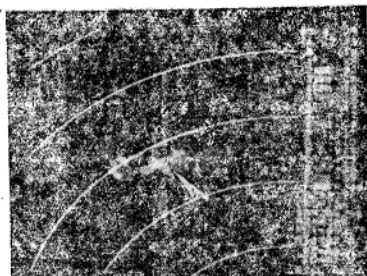
Burgess(1976)在俄克拉何马的探测中采用并改进了Donaldson的中尺度气旋识别标准,同时还增加了一条要求,即这一对速度的轴与从固定距离的距标线之间所成的角应少于 45° 。这对速度如违反了这个方向可以认为是控制涡度分量的辐散(或辐合)的征兆。在JDOP试验进行期间,其他客观规则也被用来判别TVS和低层直线风(Burgess等人,1979)。

3. JDOP试验统计结果

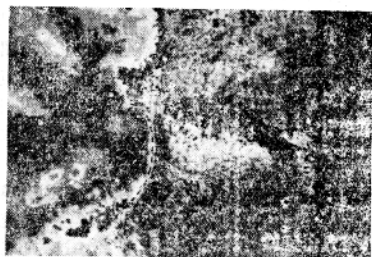
在俄克拉何马城JDOP与NWS预报台之间进行了一场生动的竞赛,目的是要检验



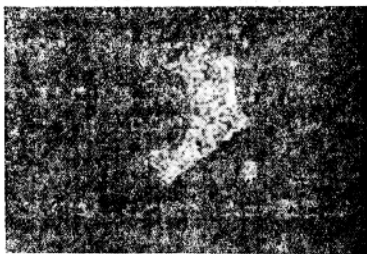
A



B



C



D



E



F

图1•说明各种强风暴特征的多普勒速度图象

A. 当龙卷出现时的地面中尺度气旋，黄色及红色等值线表示移离雷达的速度（单箭头所示），而蓝色等值线（双箭头所示）表示移向雷达的速度；

B. 1979年5月2日最大龙卷威胁Vance空军基地，中尺度气旋伸向8公里高度（图中箭头所示）；

C. 1973年4月30日强阵风锋从西面逼近雷达，产生阵风锋（点虚线所示）的雷暴在后面几公里处；

D. 在图1C中的阵风锋径向切变计算，所处理的面积限于由彩色质标志的方位和距离；

E. 蓝色等值线表示1978年5月2日阵风锋（虚线所示）由西西南方向接近雷达；

F. 当1978年5月2日阵风锋经过雷达时，雷达测得的速度放大图，仰角为 4.4° 。见正文对此图象中风结构的分析

•限于印刷条件，原文中的彩色图象本集均改为黑白图象——译注。

多普勒雷达技术对龙卷和强雷暴的报警能力，与从事此职务最有才干和有经验的预报人员所应用的通常方法作比较。这场竞赛是在JDOP试验的头两年进行的。

描述这些结果的参数有提前时间(LT)，探测概率(POD)、虚警率(FAR)，以及一个量度整个预报技巧的、由Donaldson等人(1975)提出的临界成功指数(CSI)。提前时间是警报发出到龙卷触地或强风暴灾害开始的时间差，以分钟为单位计。其他统计数字以报准、漏报及虚警来表示，令 x =正确预报灾害的数目(报准)， y =对灾害事例未报成灾害性的数目(漏报)，而 z =是报成灾害性天气而实际上未发生的数目(虚警)，于是

$$POD = \frac{x}{(x+y)} \quad (1)$$

$$FAR = \frac{z}{(x+z)} \quad (2)$$

$$CSI = \frac{x}{(x+y+z)} \quad (3)$$

临界成功指数只是成功对成功与失误(包括漏报与虚警)之和的比值。CSI的范围在1(完全成功)与0(完全失败)之间。假如不能明确得到 x 、 y 和 z ，CSI也可由POD和FAR直接算出：

$$CSI = ((POD)^{-1} + (1-FAR)^{-1} - 1)^{-1} \quad (4)$$

统计结果列于表1，JDOP对无龙卷的冰雹和风灾的警报在1977年内未进行，所以这类风暴的结果只有1978年的。多普勒雷达对所有各类风暴都比常用警报方法好，虽然强风暴提前时间及对龙卷的探测概率都相近而无显著差别。然而对龙卷的提前时间和两类风暴的误警率则有惊人的差别。图2提供了对龙卷的这些差别的描述。

在这次JDOP竞赛中未署名的主角是俄

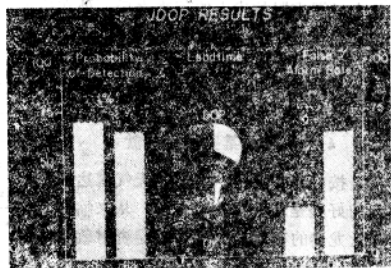


图2 在1977—1978年期间，JDOP对龙卷的探测结果与俄克拉何马城天气预报服务台的常用方法所得结果的比较

表1 警报比较统计

龙卷：1977—1978年

JDOP	OKC (俄克拉何马城) WSFO (天气预报服务台)
LT=20.1分	LT=1.8分
POD=0.69	POD=0.64
FAR=0.25	FAR=0.63
CSI=0.56	CSI=0.30

无龙卷冰雹和大风：1978

JDOP	OKC	WSFO
LT=15.4分	LT=13.8分	
POD=0.70	POD=0.47	
FAR=0.16	FAR=0.40	
CSI=0.62	CSI=0.36	

克拉何马城天气预报服务台的预报员们。他们被安排在极不称心的岗位上代表过时的方法，而他们却完成得十分出色。在Pears-on和David(1979)所作的1976—1978年间全国范围内的警报检验比较中，俄克拉何马城预报员们的CSI成绩是对龙卷有6次领先，对强风暴有9次领先。

在1978年末，多普勒雷达的价值业已得到证实，统计比较已无必要，于是1979年试验的焦点就转移到展示由人工辅助的自动显示产品通过电话数据线传输到远离雷达的边远地区的有效性。在1979年风暴季节的头

几个星期克服技术上的困难之后，处在边远地区的预报员们发现显示的产品是非常有用的，特别是对5月2日的龙卷和灾害性雹暴，这天的事例在下面将进行讨论。

4. JDOP的某些杰出成就

按作者的意见，多普勒天气雷达最大的好处是能保护生命安全。从来临的最大龙卷的破坏中去保护固定资财就难以有所作了。然而，更早、更精确及更可靠的报警可以通过多普勒雷达技术使处于危险地区的人民逃脱灾害和死亡去寻求保护。在JDOP计划执行期间有好几个对公众安全作出了贡献的例子。

4.1 Marlow城

图3中画出了1978年4月5日的事例。JDOP试验小组识别出在俄克拉何马州的Lawton城南部的一个风暴中有一个中尺度气旋并伴有TVS，向着东北方移动，并在19:45 (CST, 美国中部标准时间, 下同) 通告俄克拉何马预报台，该台迅速地发出了一个龙卷警报，但是他们根据的是一个未经核实而且显然错误的公众的报告，把龙卷的位置确定在图3中的T处，即在TVS的北边有相当的距离。在19:58CST，由Bjerkaas和Forsyth (1979) 发展的AFGL回波追踪显示技术指示出龙卷风暴已经变成右移风暴，当时是直接朝东移动。在20:00CST，JDOP告知俄克拉何马天气预报台关于风暴移动的变化并再度肯定TVS的正确位置。俄克拉何马天气预报台马上发出一个修正了的具有正确位置和方向的龙卷警报，但未能及时向Pumpkin中心的居民发出警报，在那里龙卷的袭击造成相当可观的财产损失，幸好只有一个人受轻伤。然而修改后的警报在Marlow城附近挽救了生命，或者至少免受严重伤害。在夜暮中，第二个龙卷于20:24 CST接地并破坏了Byrd家农舍。Byrd一家

相信修正后的龙卷警报并采取了防范措施，在龙卷袭击时，躲在他们的防风暴地下室里以保安全。

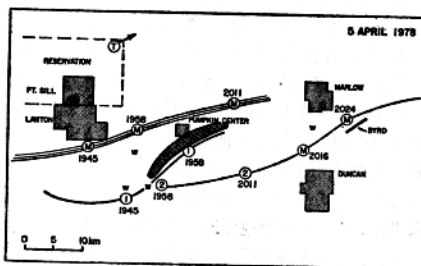


图3 1978年4月5日，中尺度气旋(M)和两个TVS(1)和(2)的路径。Pumpkin中心的龙卷灾害路径是阴影线，Marlow龙卷是粗实线，标有T之圆圈表示NWS第一次警报给出的错误的龙卷位置，直线W表示如W所示

4.2 Piedmont城

1978年4月30日最大龙卷破坏了俄克拉何马州Piedmont城的一部分，灾害路径的宽度达2公里以上，强度达F4，家畜都死亡了，有25座房舍遭完全毁坏或严重破坏，但却无一个人伤亡。每个人都惧于龙卷纷纷离开出事地区，在防风暴地下室里隐蔽起来。

这天许多人的生命得保安全，确信应归功于JDOP探测的及时和精确，注意听取警报的高度警觉的公众，以及此次龙卷形成的缓慢。图4给出Piedmont风暴在它发展为最大龙卷过程中近于1小时间隔中3个时刻观测到的多普勒速度。雷达位置在照片的右下角。距离标志为32公里间隔，雷达天线的仰角为15°，与风暴环流的截点高度为1—2公里，用米/秒表示的平常多普勒速度均按右边的色标标出，其中红色数字相当于移离雷达的速度，蓝色数字相当于移向雷达的速度。在左下方于17:29CST，有一个涡旋

标志业已形成，但它的直径大至11公里，具有刚足以确认其为中尺度气旋的切变阈值。在17:42CST已可识别出一个带有TVS（单箭头所示）的中尺度气旋，故JDOP发出了龙卷袭来的告诫。中间部分是18:01CST探测到的，环流急剧收缩，速度增加，

已形成的中尺度气旋伴有两个TVS（单箭头所示）。右上方的主要特征是18:26CST探测到的，则是与极大龙卷有关的极强TVS（单箭头所示），此极大龙卷已到达地面有6分钟了。

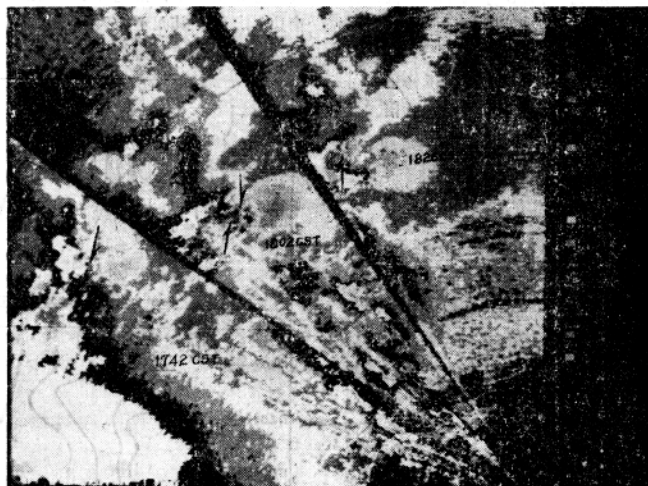


图4 1978年4月30日俄克拉何马龙卷。Piedmont风暴演变时期内3次(时间分别为17:42、18:01、18:26CST)观测到的多普勒速度。正文中有详细说明

4.3 Vance空军基地

Vance空军基地对1979年5月2日的强风暴发出的警报对保护生命和财产安全提供了一次机会。这次风暴又给出了自动显示产品如何促成一次成功的预报实例。

空军天气局的技术中士Norm Chaney在1979年的试验中负责向俄克拉何马州的军事基地发警报。他住在OKC WFSO,在那里他每隔6分钟收到一次由计算机送出的图象，这是来自JDOP并传输到他的电视屏幕上。在15:26CST他所收到的图象见图5(原图模糊不清,略)。这是一份俄克拉何

马州的县界地图，除去具有风暴回波的两个等级的反射因子的狭长地带外，小的十字表示12及24分钟以后计算出来的回波中心的位置。回波1慢慢朝着标志着Vance空军基地的小方块移去。当时的风两次预报的时间列于右下方，用两行数字及字母来表示风暴主要特征的回波鉴别表则附在右上方。此自动化系统是由Bierkaas和Forsyth(1980a,b)研制的。

在图5(略)的图表显示时间，由回波1识别出一个中尺度气旋。Chaney向Vance空军基地发出了第一次警报。在16:15

CST龙卷袭来并持续了一个小时以上，开始时小但很快就发展成最大龙卷，并伴有象垒球大小的冰雹。图1B就是表示此时的中尺度气旋。龙卷在穿过Vance空军基地时上抬，基地的好几座大楼屋顶被掀走并降了一场大冰雹。由于要求所有人都隐蔽起来，基地内无一伤亡。所有在停机坪的飞机都转移到机库，因此在这场范围宽广而强大的冰雹（其大小象高尔夫球）袭来时，52架T-38飞机没有受到损失。节省的飞机修理费可能比整整三年的JDOP预算还多好几倍。

5. 从失败中吸取教训

5.1 Wichita Falls龙卷

1979年4月10日的一次巨大风暴令人信服地表明应用5厘米波长雷达来追踪置人于死地的最大龙卷的危险性。对强烈风暴的探测，雷达的波长最好选用10厘米，因为与5厘米相比，在暴雨中它的衰减减小并能使模糊速度区间范围增加一倍。然而，好的角度分辨率是非常宝贵的，从图6比较中可以看出5厘米雷达因其价廉也仍然是有吸引力的。

在1979年AFGL把它的的5厘米多普勒雷达带到俄克拉何马州供JDOP应用，把它设在诺曼，距NSSL的两部10cm雷达100米内。当4月10日的风暴首先被观察到时（图7），衰减还未造成大问题，但当在西南方很远处Wichita Falls风暴移近并与其中间的风暴排列成一直线时（图8），衰减问题就严重了。与此同时，WSR-57 10厘米雷达给出了非衰减的图象（见图9）。经过大约半小时的时间，一个最大龙卷正袭击着Wichita Falls地区中一条宽阔的地带，而5厘米雷达竟不能探测到任何回波。更有甚者，Allen等人（1981）的研究表明，中间距离上的风暴在其南侧大大地衰减了，所以它的中尺度气旋就部分地或彻底地探测不到

了。

由此得到的教训是对中尺度气旋和TVS的探测说来，当必须使雷达射线穿透巨大的、非常强的并经常发生最大龙卷的风暴，此时采用5厘米雷达就是拣了芝麻丢了西瓜的投资方针。只有当风暴环流最接近雷达（在通常情况下，雷达位于风暴的南边或西南边），并且其间不插入强降水时，5厘米雷达的可靠性才是信得过的。

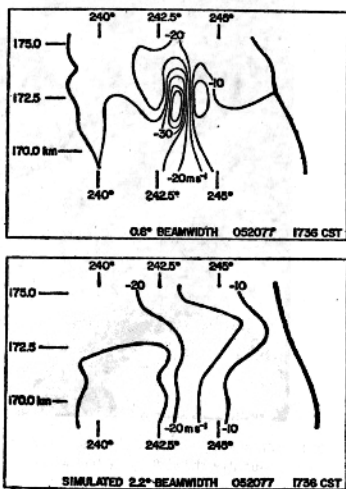


图6由NSSL0.8°的半功率波束宽度的多普勒雷达对龙卷风暴观测到的速度等值线（上幅）。当波束宽度增加到2.2°，同样的速度可能出现的模拟图象（下幅）。注意“中尺度气旋对”已经完全从模拟的低分辨率等值线中消失

5.2 Newkirk风暴

在1978年4月17日有一条干线，其两侧气团具有非常明显的湿度对比，这已为10厘米雷达所探测到。图10表明干线沿线无降水，干线回波强度的情况（图中箭头所示）。在图10以后半小时，风暴回波出现在远离干线回波较远处。新回波的形成迅速，并向南移动，尽管有单个回波向东北方向移动。在

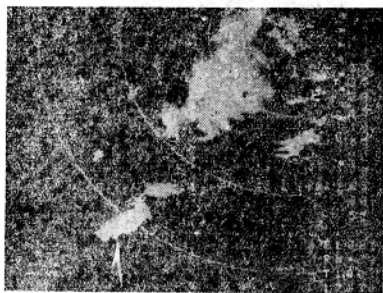


图7 1979年4月10日17:30CST, 5厘米雷达观测到的龙卷风暴(箭头所示), 这个风暴后来在西南方远处产生了最大的龙卷, 它破坏了得克萨斯州Wichita Falls的部分地区, 导致44人死亡, 伤850人



图8 5厘米雷达在图7的12分钟以后观测到的同一风暴, 时间是17:42CST. Wichita Falls风暴回波已有很大的衰减(箭头所示), 它已移动与其他风暴成为一条带, 在近距离处另有一个大而强的风暴

13:39CST, 有一个弱的初始回波出现在一个风暴中, 以后称之为“Newkirk”。在13:51CST, Newkirk风暴迅速地增长, 最大反射率达50dBZ, 12分钟内增强了30dB₁。此外, 与此同时有一个强“中尺度气旋对”开始出现。3分钟后, 这一串4个小而相当强的龙卷中的第一个袭击了俄克拉何马州的Newkirk小镇。从初始回波到第一个龙卷只有15分钟的时间! 很明显, JDOP漏报了这

一个。

Burgess和Donaldson (1979)讨论了最小的龙卷的可探测性问题, 幸运的是这些小龙卷很少是致命的。空间分辨率是一个共同的难题。对于Newkirk龙卷, 时间的分辨就成了探测中的难题。所有这次风暴的特征都发展得太快了。

由Aldridge等人(1979)在此事件后对Newkirk风暴的研究, 提供了对这类风暴最终开发出某种报警可能性的思路。在第一次龙卷之前半小时, 探测到了第2个晴空回波线(图11中单箭头所示), 从西南方向弯向干线回波。后来发现这是一个冷锋的前沿, 两条线相交的点(图11中双箭头所示)迅速地朝南移动, 这是由于冷锋速度较快, 同时这种相交会合好象促成了风暴回波的形成。这两条晴空回波线的照片, 如图11所示, 在其会合后产生了风暴回波。也许能够被雷达探测到的任何干线或在具有足够湿度对比的气团之间的边界被认为是强烈对流发展的场所。能为雷达所探测到的两个带的会合处很可能是触发强风暴迅速生长之处, 这与若干年前Tepper (1950)所提出的意见相似, 他认为龙卷发展的最适合区域就是两条气压涌升线的交点, 这个观念还需作定量检验。

6. 阵风锋的探测

在JDOP执行中有两次阵风锋被探测到并为Donaldson和Bjerkaas (1980)所研究, 这表明多普勒雷达对影响低空飞行飞机的危险天气有非常好的探测能力。在1978年4月30日的Piedmont龙卷过后两小时, 被认为是一次阵风锋的速度结构出现在另一个雷暴的前沿。当最初探测到时有51公里远, 以19米/秒的速度朝雷达移动。图1C示出它在30公里距离、高度略低于1公里处的明显外貌。最小移向雷达的速度的区域处于阵风锋