

多普勒天气雷达 原理与业务应用

俞小鼎 姚秀萍 熊廷南 周小刚 吴洪 邓北胜 宋燕 编著

气象出版社



多普勒天气雷达 原理与业务应用

俞小鼎 姚秀萍 熊廷南
周小刚 编著
吴 洪 邓北胜 宋 燕

气象出版社

内容提要

本书深入浅出地介绍了多普勒天气雷达的基本原理,详细阐述了多普勒天气雷达在探测和预警冰雹、龙卷、灾害性大风、短时暴雨、暴洪等强对流天气和雨量估计方面的业务应用。全书共分8章。第一到第四章是多普勒天气雷达的基本知识部分,第五和第六章详细介绍了强对流天气系统的雷达探测和强对流天气的预警。第七章介绍了各种雷达产品和相应的算法。第八章描述了多普勒天气雷达在一些实际的强对流或强降水个例中的应用。书中使用了300多幅业务多普勒天气雷达的彩色回波图,使叙述更加生动翔实。

本书可作为气象部门短期和短时预报员的培训教材,也可作为大气科学方向本科生和研究生的教学参考书,也可供从事气象和水文的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

多普勒天气雷达原理与业务应用/俞小鼎编著. —北京:
气象出版社,2006.1

ISBN 7-5029-4111-8

I. 多... II. 俞... III. 多普勒雷达:气象雷达-
研究 IV. TN959.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 004532 号

出版者:气象出版社 地 址:北京市海淀区中关村南大街46号

网 址: <http://cmp.cma.gov.cn> 邮 编:100081

E-mail: qxcbs@263.net 总编室:010-68407112

责任编辑:俞卫平 章澄昌 发行部:010-62175925

终 审:陆同文

封面设计:王 伟

责任技编:吴庭芳

印刷者:北京佳信达艺术印刷有限公司

发行者:气象出版社

开 本:880×1230 1/16 印 张:20.25 字 数:630千字

版 次:2006年2月第一版 2006年2月第一次印刷

书 号:ISBN 7-5029-4111-8/P·1490

印 数:1—5000册

定 价:90.00元

本书如存在文字不清,漏印以及缺页,倒页,脱页等,请与本社发行部联系调换

前 言

为了配合新一代天气雷达业务应用的培训工作,中国气象局培训中心在翻译美国新一代天气雷达 WSR-88D 培训教材的基础上,于 2000 年编写了“新一代天气雷达原理与应用讲义”。该讲义在培训中心举办的 20 多期天气雷达应用培训班中使用获得了很好的效果。自 2003 年开始,我们对该讲义进行了重大的修改,尤其是增添了许多中国新一代天气雷达的回波个例,形成目前的版本。本书的读者对象主要是使用多普勒天气雷达资料进行强对流天气分析和预报预警的天气预报业务人员,也可作为大气科学领域的本科生、研究生和相关科研业务人员的参考书。

本书第一章介绍多普勒天气雷达的基本构成和主要应用领域。第二章简要介绍多普勒天气雷达的原理。第三章是雷达回波图识别的基本知识,包括反射率因子回波和平均径向速度回波。第四章为雷达数据质量控制,主要涉及地物杂波、距离折叠和速度模糊的辨认和处理。第五章详细介绍对流风暴及其雷达回波特征,包括对流风暴生成的环境条件、分析手段和各类对流风暴的回波特征。第六章详细讨论了龙卷、大冰雹、地面灾害性大风和暴洪等强对流天气的多普勒天气雷达的探测和预警技术。第七章介绍了新一代天气雷达的各种产品及其算法,包括基本反射率因子、平均径向速度、相对风暴平均径向速度、组合反射率因子、垂直累积液态水含量、风暴顶、风暴路径信息、冰雹指数、中气旋、速度方位显示风廓线、1 小时和 3 小时累积雨量等。雷达降水估计的内容也包括在第七章中。第八章给出了一些强对流天气过程多普勒天气雷达分析的具体和详细的实例,大部分为中国的个例,小部分为美国的个例。

本书的策划为俞小鼎、高学浩和于玉斌,主编为俞小鼎。第一章由俞小鼎编写,其中部分内容由葛润生研究员提供。第二章由熊廷南和俞小鼎编写。第三章由吴洪和俞小鼎编写。第四章由周小刚和俞小鼎编写。第五章由姚秀萍和俞小鼎编写。第六章由俞小鼎和姚秀萍编写。第七章由俞小鼎、周小刚和邓北胜编写。第八章由俞小鼎和宋燕编写。

美国新一代天气雷达 WSR-88D 培训教材是本书的主要参考资料,它的主要策划者是 Leslie Lemon 先生,在此我们对他表示衷心的感谢。Lemon 先生曾于 2002、2003、2004 和 2005 年连续四年在中国气象局培训中心举办的“新一代天气雷达原理与应用高级讲习班”上担任主讲。

编 者

2005 年 12 月 北京

目 录

前言

第一章 引论	(1)
1.1 我国新一代天气雷达网	(1)
1.2 天气雷达发展简史	(1)
1.3 我国新一代天气雷达系统的性能要求	(3)
1.4 新一代天气雷达的应用领域	(3)
1.4.1 对灾害性天气的监测和预警	(3)
1.4.2 定量估测大范围降水	(4)
1.4.3 风场信息	(4)
1.4.4 改善高分辨率数值天气预报模式的初值场	(4)
1.5 我国新一代天气雷达 CINRAD 概述	(4)
1.5.1 雷达数据采集子系统(RDA)	(5)
1.5.2 雷达产品生成子系统(RPG)	(7)
1.5.3 主用户处理器(PUP)	(9)
1.5.4 新一代天气雷达的进一步改善	(11)
1.6 新一代和传统天气雷达在探测强对流天气方面的评分对比	(11)
1.6.1 局地强风暴	(12)
1.6.2 龙卷	(13)
1.6.3 暴洪	(14)
1.6.4 综合	(14)
1.7 本章小结	(15)
第二章 多普勒天气雷达原理	(17)
2.1 气象目标对雷达电磁波的散射	(17)
2.1.1 后向散射截面	(17)
2.1.2 圆球形粒子的散射	(17)
2.1.3 粒子群的散射	(19)
2.2 电磁波在大气中的衰减和折射	(19)
2.2.1 电磁波在大气中的衰减	(19)
2.2.2 电磁波在大气中的折射	(22)
2.3 雷达气象方程	(26)
2.3.1 一些重要的雷达参数	(26)
2.3.2 雷达气象方程	(28)
2.3.3 气象目标强度的雷达度量	(30)
2.4 距离折叠	(32)
2.4.1 最大不模糊距离	(32)
2.4.2 距离折叠	(32)
2.5 回波信号中信息的提取	(34)
2.5.1 多普勒效应	(34)

2.5.2	WSR-88D 和 CINRAD 的速度探测方法	(35)
2.5.3	最大不模糊速度与速度模糊	(36)
2.5.4	获取 I 和 Q 值	(37)
2.5.5	基数据的产生	(41)
2.6	WSR-88D 和 CINRAD-SA 雷达的取样技术	(43)
2.6.1	两种基本取样模态	(44)
2.6.2	三种取样方式	(44)
2.6.3	体积扫描模式 VCP	(44)
2.7	本章小结	(45)
第三章	多普勒雷达图识别基础	(47)
3.1	雷达图像的 PPI 显示方式	(47)
3.2	反射率因子图	(47)
3.2.1	降水回波	(47)
3.2.2	非降水回波	(51)
3.3	识别径向速度图的基本知识	(53)
3.3.1	较大尺度连续风场的识别	(53)
3.3.2	大尺度水平风场不连续流型(锋区等)的识别	(58)
3.3.3	γ 中尺度(2~20 km)系统的速度图像特征	(60)
3.4	本章小结	(61)
第四章	雷达数据质量控制	(63)
4.1	地物杂波抑制	(63)
4.1.1	普通地物杂波	(63)
4.1.2	异常地物杂波	(64)
4.1.3	地物杂波抑制	(65)
4.1.4	地物杂波抑制的实施	(66)
4.1.5	地物杂波抑制的优点局限性	(70)
4.1.6	间歇性点杂波抑制	(71)
4.2	距离折叠和去折叠算法	(72)
4.2.1	距离折叠	(72)
4.2.2	距离去折叠算法	(73)
4.2.3	距离去折叠个例	(77)
4.2.4	距离去折叠算法的优点和局限性	(79)
4.2.5	在雷暴被紫色覆盖情况下的一个应对技巧	(81)
4.3	速度模糊和退模糊算法	(82)
4.3.1	速度模糊	(82)
4.3.2	速度退模糊算法	(83)
4.3.3	不适当的退模糊的速度	(86)
4.3.4	速度退模糊算法的优点和局限性	(86)
4.4	本章小结	(87)
第五章	对流风暴及其雷达回波特征	(90)
5.1	对流风暴及其产生的环境条件	(90)
5.1.1	对流风暴的分类	(90)
5.1.2	普通对流单体的演变	(91)
5.1.3	影响对流风暴结构和类型的环境因子	(91)

5.1.4	风暴运动	(95)
5.2	速度矢端图及其业务应用	(95)
5.2.1	速度矢端图	(95)
5.2.2	垂直风切变与水平涡度	(97)
5.2.3	相对风暴气流和沿流线方向涡度	(98)
5.2.4	相对风暴螺旋度	(100)
5.2.5	本节小结	(102)
5.3	强风暴的雷达回波特征	(102)
5.3.1	弱垂直风切变环境中的强风暴——脉冲风暴的回波特征	(102)
5.3.2	中等到强垂直风切变环境中多单体风暴的雷达回波特征	(104)
5.3.3	超级单体风暴的反射率因子特征	(109)
5.3.4	超级单体风暴的径向速度回波特征——中气旋	(116)
5.3.5	飚线的雷达回波特征	(122)
5.4	超级单体风暴动力学	(124)
5.4.1	对流层中层旋转发展的初始特征	(124)
5.4.2	风暴分裂	(124)
5.4.3	右移风暴的选择性	(126)
5.4.4	小结	(127)
5.5	本章小结	(129)
第六章	灾害性对流天气的探测与预警	(130)
6.1	龙卷	(130)
6.1.1	超级单体龙卷	(132)
6.1.2	非超级单体龙卷	(143)
6.2	大冰雹	(145)
6.2.1	大冰雹形成和增长的环境特征	(145)
6.2.2	大冰雹的多普勒天气雷达探测	(149)
6.3	灾害性大风	(155)
6.3.1	下沉气流的生成和维持	(155)
6.3.2	弱垂直风切变条件下对流风暴产生的风害	(158)
6.3.3	中等到强垂直风切变条件下对流风暴产生的风害	(163)
6.4	暴雨	(170)
6.4.1	造成短时暴雨的主要因子	(170)
6.4.2	天气雷达在暴雨预报中的作用	(172)
6.5	强对流天气预报和警报的发布	(176)
6.5.1	强对流天气预警步骤	(176)
6.5.2	强对流天气预警的发布	(179)
6.6	本章小结	(180)
第七章	雷达产品与算法	(181)
7.1	基本产品	(182)
7.1.1	反射率因子(R)	(182)
7.1.2	平均径向速度(V)和谱宽(SW)	(183)
7.2	一些算法简单的重要导出产品	(183)
7.2.1	相对于风暴的平均径向速度图(SRM)	(183)
7.2.2	相对于风暴的平均径向速度区(SRR)	(184)

7.2.3	强天气分析(SWA).....	(184)
7.2.4	组合反射率因子(CR).....	(185)
7.2.5	回波顶(ET)	(185)
7.2.6	垂直累积液态水(VIL)	(185)
7.2.7	剖面产品	(187)
7.3	风暴单体识别与跟踪算法及其产品	(187)
7.3.1	引言	(187)
7.3.2	SCIT 算法	(188)
7.3.3	算法表现的评估	(193)
7.3.4	SCIT 算法的产品	(196)
7.3.5	本节小结	(196)
7.4	冰雹指数(HI)产品及其算法	(197)
7.4.1	冰雹指数产品	(197)
7.4.2	旧的冰雹算法	(199)
7.4.3	新的 WSR-88D 冰雹探测算法	(199)
7.5	中气旋(M)和龙卷式涡旋特征(TVS)算法与产品	(207)
7.5.1	WSR-88D 中气旋算法	(207)
7.5.2	中气旋(M)产品	(208)
7.5.3	WSR-88D 旧算法中的龙卷式涡旋特征 TVS 算法和产品	(209)
7.5.4	中气旋和龙卷涡旋特征算法的改善	(210)
7.6	VAD 风廓线算法	(216)
7.6.1	VAD 风廓线算法	(216)
7.6.2	速度方位显示风廓线产品 VWP	(217)
7.7	降水算法及其产品	(217)
7.7.1	降水检测功能块 PDF	(218)
7.7.2	雨量计数据获取	(219)
7.7.3	反射率因子预处理	(219)
7.7.4	降雨率转换	(221)
7.7.5	降水累加	(222)
7.7.6	利用雨量计数据对雷达估测降水进行订正	(223)
7.7.7	降水产品生成	(224)
7.7.8	目前的局限性和未来的挑战	(226)
7.7.9	随后的降水处理	(227)
7.7.10	小结	(229)
7.8	本章小结	(230)
第八章	多普勒天气雷达实际应用个例分析	(232)
8.1	2002 年 5 月 27 日安徽超级单体风暴个例	(232)
8.1.1	引言	(232)
8.1.2	天气背景	(233)
8.1.3	多普勒雷达资料分析	(235)
8.1.4	强对流天气预警	(242)
8.1.5	总结和讨论	(242)
8.2	WSR-88D 描述一次超级单体与弓形回波的相互作用	(243)
8.2.1	引言	(243)

8.2.2	风暴发生前的环境和风暴尺度事件·····	(243)
8.2.3	风暴相互作用和结果的 WSR-88D 描述·····	(245)
8.2.4	强对流天气的预警·····	(247)
8.3	夏威夷 Kona 低压造成的灾害性天气和弓形回波·····	(248)
8.3.1	引言·····	(248)
8.3.2	天气系统·····	(250)
8.3.3	中尺度分析·····	(253)
8.3.4	预报根据·····	(258)
8.3.5	结论和总结·····	(259)
8.4	雷达“三体散射长钉”:一个可用于业务预报的大雹特征·····	(260)
8.4.1	发生于湖南的两次强对流风暴事件的多普勒天气雷达资料分析·····	(260)
8.4.2	2002 年 12 月 19 日福建龙岩 CINRAD-SA 雷达观测到的冬季冰雹过程·····	(269)
8.4.3	小结·····	(271)
8.5	一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析·····	(273)
8.5.1	引言·····	(273)
8.5.2	天气背景·····	(273)
8.5.3	多普勒雷达资料分析·····	(274)
8.5.4	下击暴流强迫机制的讨论·····	(280)
8.5.5	小结·····	(281)
8.6	WSR-88D 雷达对强降水事件的降水估计·····	(282)
8.6.1	引言·····	(282)
8.6.2	数据·····	(282)
8.6.3	气候学分析·····	(283)
8.6.4	个例研究·····	(285)
8.6.5	总结和结论·····	(296)
8.7	一次强烈龙卷过程的新一代天气雷达探测·····	(297)
8.7.1	引言·····	(297)
8.7.2	天气背景·····	(297)
8.7.3	多普勒天气雷达资料分析·····	(299)
8.7.4	讨论与总结·····	(305)
	参考文献·····	(307)

第一章 引论

天气雷达是探测降水系统的主要手段,是对强对流天气(冰雹、大风、龙卷和暴雨)进行监测和预警的主要工具之一。天气雷达发射脉冲形式的电磁波,当电磁波脉冲遇到降水物质(雨滴、雪花和冰雹等)时,大部分能量会继续前进,而一小部分能量被降水物质向四面八方散射,其中向后散射的能量回到雷达天线,被雷达所接收。根据雷达接收的降水系统回波的特征可以判别降水系统的特性(降水强弱、有无冰雹、龙卷和大风等)。传统的天气雷达只能测量回波的强度,即所谓的反射率因子。新一代天气雷达是多普勒天气雷达。它除了测量雷达的回波强度外,还可以测量降水目标物沿雷达波径径向的运动速度(称为径向速度)和速度谱宽(速度脉动程度的度量)。

新一代天气雷达系统建设是我国 20 世纪末、21 世纪初的一项跨世纪的气象现代化工程。我国新一代天气雷达业务组网的建设目标是:在我国东部和中部地区,装备先进的新一代 S 频段(10 cm)和 C 频段(5 cm)多普勒天气雷达系统,对强对流、热带气旋和暴雨等重要天气系统进行有效的监测和预警,并对降水量进行估测。本书的目的是介绍新一代天气雷达的原理和业务应用。

1.1 我国新一代天气雷达网

我国正在建设的新一代天气雷达的布局原则是:(1)在我国沿海和多强降水的地区,即我国第三地形阶梯地域(黑龙江、吉林省除外)和四川盆地的大部地区布设 S 频段新一代天气雷达。该地域包括京、津、冀、鲁、苏、沪、浙、皖、赣、闽、粤、琼和辽、豫、鄂、湘、桂、川、渝的多强降水地区;(2)在我国强对流天气发生和活动较频繁、经济比较发达的中部地区,即我国第二地形阶梯地域和黑龙江、吉林省布设 C 频段新一代天气雷达。该地域包括黑、吉、蒙、晋、陕、黔、滇、宁和辽、豫、鄂、湘、桂、川、甘的部分地区;(3)其他地区,即我国第一地形阶梯地域的青、新、藏等地域暂不布设全国组网的站点,但省(区)会所在地和重要地区根据气象服务工作的需要和可能,应按统一业务布点要求设置新一代 C 频段天气雷达,作为局地监测和服务使用;(4)在天气、气候相近的地区,组网的新一代天气雷达在频段和规格上要尽可能统一,不同频段和规格的雷达原则上不相互穿插布设;(5)组网雷达站距密度应保证雷达探测能有效覆盖布网区域,以满足对灾害性天气进行有效监测、预警和中尺度数值天气预报对风场值的要求。计划在全国共布置 158 部新一代天气雷达,图 1.1 为其中的 126 部的站点分布图。到 2005 年 5 月份为止,已布设 80 余部新一代天气雷达。

1.2 天气雷达发展简史

从第二次世界大战后雷达技术引用到气象部门至今已有 50 多年历史。用于探测云雨降水、监测强对流天气的天气雷达已成为雷达技术中的一个分支。目前约有 1000 部以上的天气雷达布设在世界各地,用于监测强对流天气、定量估计降水,是气象部门的重要探测和监测手段之一。天气雷达的发展大致经历了四个阶段:(1)20 世纪 50 年代以前,用于气象部门的天气雷达主要是由军用的警戒雷达进行适当的改装而成,如美国国家天气局用的 WSR-1、WSR-3,英国生产的 Decca41、Decca43 等。国内也曾在 1950 年引进 Decca41 雷达用于监测天气。当时选用的波长主要采用 X 波段(3 cm),少量 S 波段,性能与军用的警戒雷达无多大差异;(2)20 世纪 50 年代中期根据气象探测的需求,开始设计专门用于监测强天气和估测降水的雷达,命名为天气雷达。1953 年美国空军设计研制了 CPS-9 X 波段天气雷达,用于监

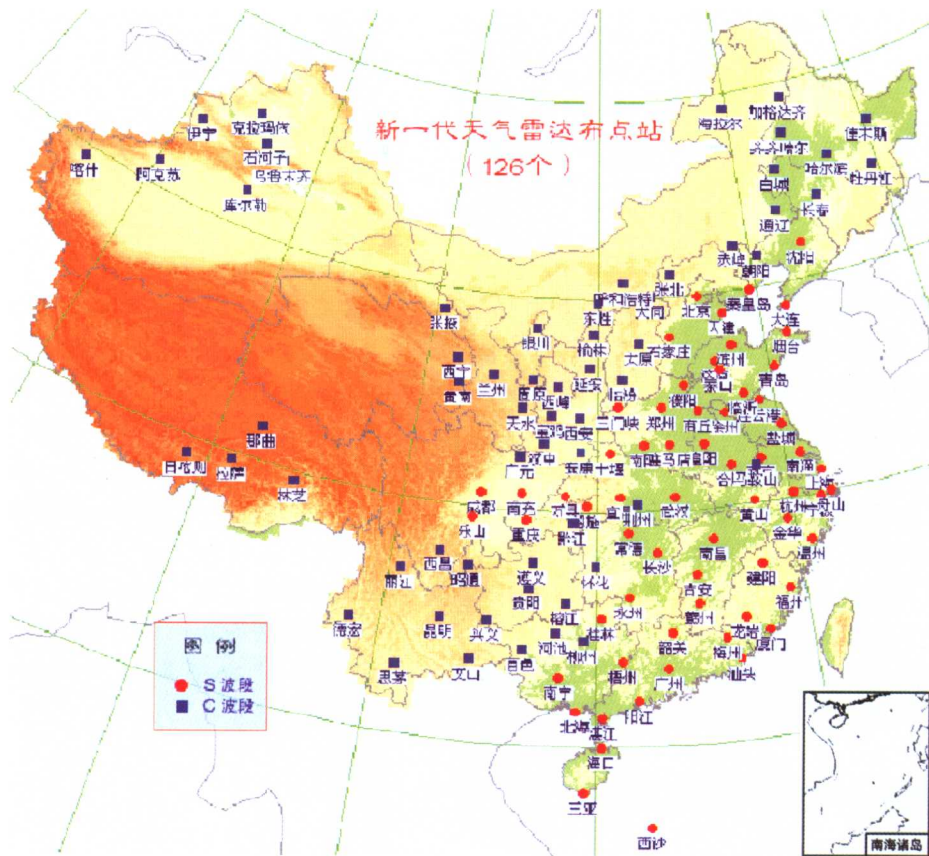


图 1.1 我国新一代天气雷达网站分布

测强对流天气和机场的飞行保障。1957年美国天气局设计生产了 WSR-57 S 波段天气雷达,主要用于监测强对流天气、大范围降水和定量估测降水。20 世纪 60 年代日本开发了 C 波段的天气雷达如 JMA-1-9 等。这阶段为气象观测使用的天气雷达,主要是在波长上做了较多的考虑,以适应气象探测要求。对回波信号强度测量和图像显示方面做了不同于军用的要求。天气雷达主要还是模拟信号接收和模拟显示的雷达图像,观测资料的存储采用照相方法。对资料的处理仍是事后的人工整理和分析。国内生产的 713 天气雷达、714 天气雷达基本属于此类产品;(3)20 世纪 70 年代中期以后,数字技术和计算机开始广泛使用。为适应气象部门对天气雷达定量估测降水和对观测资料做进一步处理的需求,天气雷达开始采用数字技术和计算机处理。天气雷达与计算机连接,形成数字化天气雷达系统。典型产品有美国 WSR-81S 天气雷达系统。同时也将数字技术与计算机处理用于对原有的常规天气雷达进行改造,使其具有数字化处理功能。国内相当一部分天气雷达采用了改造的方法使其具有数字化处理功能。数字化天气雷达系统不仅在技术上采用了数字技术,提供了数字化的观测数据,更重要的是应用计算机对探测数据进行再处理,形成多种可供观测员和用户直接使用的图像产品数据;(4)早在 20 世纪 50 年代末,研究人员就开始了多普勒雷达技术在大气探测中的试验。由于受到当时的技术条件限制,未能推广到气象业务使用。直到 20 世纪 70 年代末,数字技术、信号处理技术和计算机技术的发展,为多普勒天气雷达在大气探测中使用创造了条件。美国在 20 世纪 80 年代初开始设计为气象业务使用的多普勒天气雷达,称为新一代天气雷达(NEXRAD)。这些雷达于 1988 年开始批量生产布站,型号定为 WSR-88D,1996 年完成布点。在美国本土共布设了 155 部 WSR-88D 雷达。WSR-88D 不仅有强的探测能力,较好的定量估测降水的性能,还具有获取风场信息的功能,并有丰富的应用处理软件支持,可为用户提供多种监测和预警产品。

美国 NEXRAD 从 20 世纪 80 年代末开始布站至今已有 10 多年。随着探测技术和网络技术的发展,NEXRAD 也正在进一步的开发和发展。预计到 2007 年左右计划实现 NEXRAD 产品改进(NPI)计

划。其主要内容是增加双偏振探测功能,改变 WSR-88D 系统原封闭式的数据采集、处理、产品分发结构,使其与天气预报人机交互系统 AWIPS 有机地连接。届时,改进后的系统仍称为新一代天气雷达,但事实上其性能已有了相当大的提高。

1.3 我国新一代天气雷达系统的性能要求

为中国新一代天气雷达站网的建设,中国气象局组织编制了《新一代天气雷达系统功能规格需求书》。编制工作是在对国外多普勒天气雷达系统特别是美国 WSR-88D 的性能调研的基础上,参照近年来雷达技术、信号处理技术和计算机技术的进展,针对国内情况进行编制的。国内新一代天气雷达系统正参照《新一代天气雷达需求书》的要求研制生产。

概括起来,《新一代天气雷达系统功能规格需求书》对新一代天气雷达系统的性能有以下几方面要求:(1)新一代雷达系统对灾害性天气有强的监测和预警能力。对台风、暴雨等大范围降水天气的监测距离应不小于 400 km。对雹云、中气旋等小尺度强对流天气现象的有效监测和识别距离应大于 150 km。雷达探测能力在 50 km 处可探测到的最小回波强度应不大于 -7 dBZ(S 波段)或 -3 dBZ(C 波段);(2)新一代天气雷达系统具有良好的定量测量回波强度的性能,定量估计大范围降水。要求雷达接收机具有宽的动态范围,在 100 dB 左右。为了对降水回波功率较准确的测量,要求雷达系统具有对重要性能参数进行监测和自动标校的能力,以实现降水强度进行较准确的估算;(3)新一代天气雷达具有良好的多普勒测速能力。它能获取降水和降水云体中的风场信息,得到较准确的径向风场分布的数据,从而尽早识别弓形回波后侧入流、龙卷和下击暴流等造成风害的灾害性天气并预测其演变。此外,新一代天气雷达应有一定的晴空探测能力。获取风暴前环境场的风场信息,有助于对强对流天气发生和发展的预测。在湿润季节应能观测到 100 km 左右距离范围内的晴空大气中的径向风场分布;(4)新一代天气雷达系统应是智能型的探测系统,它有丰富的软件支持,对获取的探测信息进行综合处理。除了实时提供降水回波图像分析的信息外,还具有准实时的对多种灾害性天气的自动识别和追踪等产品;(5)新一代天气雷达系统是气象业务运行的重要设备之一,在设计中需充分注意与其他天气预报支持系统如 MICAPS 在数据格式、图形图像产品规格等方面相互衔接,从而具有开放式的良好界面。

1.4 新一代天气雷达的应用领域

新一代天气雷达系统的应用主要在于对灾害性天气,特别是与风害和冰雹相伴随的灾害性天气的监测和预警。它还可以进行较大范围降水的定量估测,获取降水和降水云体的风场结构。

1.4.1 对灾害性天气的监测和预警

新一代天气雷达观测的实时回波强度(即反射率因子 Z)、径向速度(V)、速度谱宽(W)的图像中,提供了丰富的有关强对流天气的信息。综合使用 Z, V, W 的图像,可以较准确和及时地监测灾害性天气。回波强度图的分析和应用与常规天气雷达相似,而径向风场的分析可以根据典型风场的径向分量表现出的特殊结构形态,对强对流天气伴随的典性风场进行识别。

回波强度一直是判断强对流天气的重要回波参数。径向速度分布图也是判断强天气的一种有效工具,在识别风害时特别有效。强对流天气的出现和发展往往和气流的辐合、辐散以及气流的旋转有关。径向速度分布图像中可以看出气流中的辐合、辐散和旋转的特征,并可给出定性和半定量的估算。辐合(或辐散)在径向风场图像中表现为一个最大和最小的径向速度对,两个极值中心的连线和雷达的射线相一致。气流中的小尺度气旋(或反气旋)在径向风场图像中也表现为一个最大和最小的径向速度对,但中心连线走向则与雷达射线相垂直。具有辐合(或辐散)的气旋(或反气旋)则表现出最大、最小值的连线与雷达射线走向呈一定的夹角。根据中心连线的长度、径向速度最大值、最小值及连线与射线的夹角,可以半定量地估算气旋(或反气旋)的散度和涡度。这使得多普勒天气雷达在监测龙卷、气旋和下击

暴雨等以风害为主的强对流天气中有独到之处。对于线性风中出现的强风切变的风害天气,它们的径向风场图像也有很好的标志,雷达可以估算最大风速和切变量。

1.4.2 定量估测大范围降水

新一代雷达的雷达参数在建站时都经过仔细的校准和标定。在日常的运行中定时的或每经过一个体扫之后,对影响雷达定量测量的参数进行一次自动校准和检测,以确保雷达对回波强度的准确测量。雷达测量的回波强度按照适当的 $Z-R$ 关系,对降水强度随时间进行累积转换成降水量。新一代天气雷达可以提供雷达估算的 1 小时和 3 小时的累积雨量分布,还可提供更长时间累积降水量及过程总降水的分布。新一代雷达用作估测累积降水量分布时,雷达采样的时间间隔应不超过 10 分钟。对于降水强度变化较大的对流性降水,采样时间间隔还应更小一些。新一代天气雷达还可以根据水文部门的需求,根据汇水区的划分进行区域降水总量的估算。

雷达估测降水除了雷达本身的精度限制外,还受到降水类型(影响 $Z-R$ 关系)、雷达探测高度、地面降水的差异和风等多种因素的影响,使得雷达估测值与地面雨量计测量值有差异。新一代天气雷达系统在建设过程中已考虑到在新一代天气雷达的周围设置一定数量的自动雨量计,并能及时地将实测雨量资料传送给雷达站进行检验。新一代天气雷达系统将开发应用雨量计数据校准雷达估算雨量的软件,提高新一代天气雷达系统定量估测大范围降水的精度。

1.4.3 风场信息

新一代天气雷达获取的风场信息除了在实时显示的径向速度分布图像上直接用来识别、监测强对流天气外,通过对一次完整的体扫测得的径向速度分布进行一定的反演处理可以得到以雷达为中心几十千米范围的平均垂直风廓线。在线性风的假定条件下,雷达获取的径向风速数据通过 VAD 处理,可得到不同高度上的水平风向和风速,因而可以得到垂直风廓线随时间的演变图。VAD 处理技术在新一代天气雷达系统中已作为基本应用产品。

1.4.4 改善高分辨率数值天气预报模式的初值场

通过对新一代天气雷达的反射率因子和径向速度数据进行同化,可以大大提高高分辨率数值天气预报模式初值场的精度,进而改善数值天气预报。

1.5 我国新一代天气雷达 CINRAD 概述

国内新一代天气雷达正在生产、安装和逐步投入使用中。新一代天气雷达采用全相干体制,共有 7 种型号,其中 S 波段有 3 种型号,称为 SA、SB 和 SC。SA 和 SB 是中美合资企业敏视达公司按照美国 WSR-88D 的规格生产,其正式名称为 CINRAD-SA 和 CINRAD-SB(在国际上称为 WSR-98D)。所不同的是,WSR-88D 的计算机系统是基于 UNIX 操作系统的工作站,而 WSR-98D 的计算机系统是廉价的高档 PC 机,使用 WINDOWS-NT 作为操作系统。这主要是由于近 10 年来微机性能的迅速增强。C 波段有 4 种型号,分别为 CINRAD-CB、CC、CCJ 和 CD。上述 7 种型号雷达中,SA、SB 和 CB 由敏视达公司生产,结构与 WSR-88D 类似。SC 和 CD 型雷达由国营七八四厂研制生产。CC 和 CCJ 型雷达由电子工业部合肥 38 所研制生产。

我们注意到,我国正在研制、生产和逐步投入使用的新一代天气雷达有 7 种型号,相互之间各有差异,这给本书中涉及雷达软、硬件系统的章节的编写带来困难。为简化起见,雷达软、硬件构成的介绍主要基于美国的 WSR-88D 和敏视达公司生产的我国新一代天气雷达 CINRAD-SA、SB 和 CB。

新一代天气雷达由若干个子系统构成,每个子系统都由计算机控制。这与过去的天气雷达有很大不同。这些子系统是:雷达数据采集子系统(RDA),雷达产品生成子系统(RPG)和主用户终端子系统(PUP)以及连接它们的通讯线路,如图 1.2 所示。当雷达连续地工作时,大量的数据需要迅速地处理,

因此要求使用高性能的计算机。计算机使用各种气象算法来处理数据流。图 1.3 描绘了来自 RDA 的基数据,如何经过 RPG 中各种算法的处理,成为各种气象和水文产品被最终显示在用户终端上。

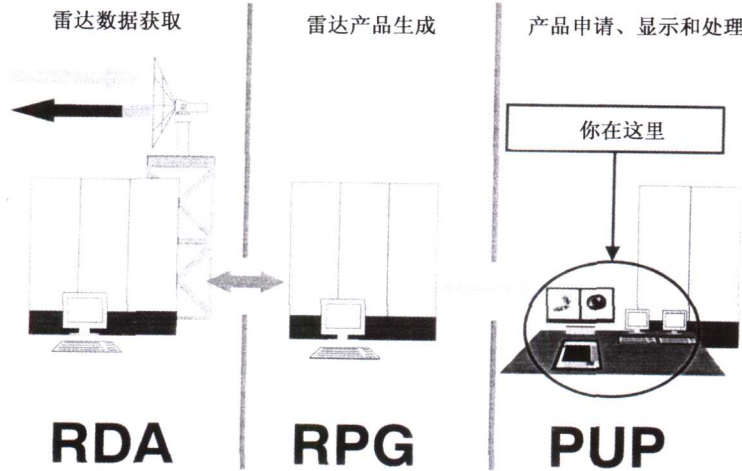


图 1.2 CINRAD-SA 型雷达的三个主要部分:雷达数据采集子系统(RDA),雷达产品生成子系统(RPG)和主用户终端子系统(PUP)以及连接它们的通讯线路。RDA 和 RPG 间由一条宽带通讯线路连接, RPG 和 PUP 间由一条窄带通讯线路连接(摘自 Crum 等, 1993,1998)

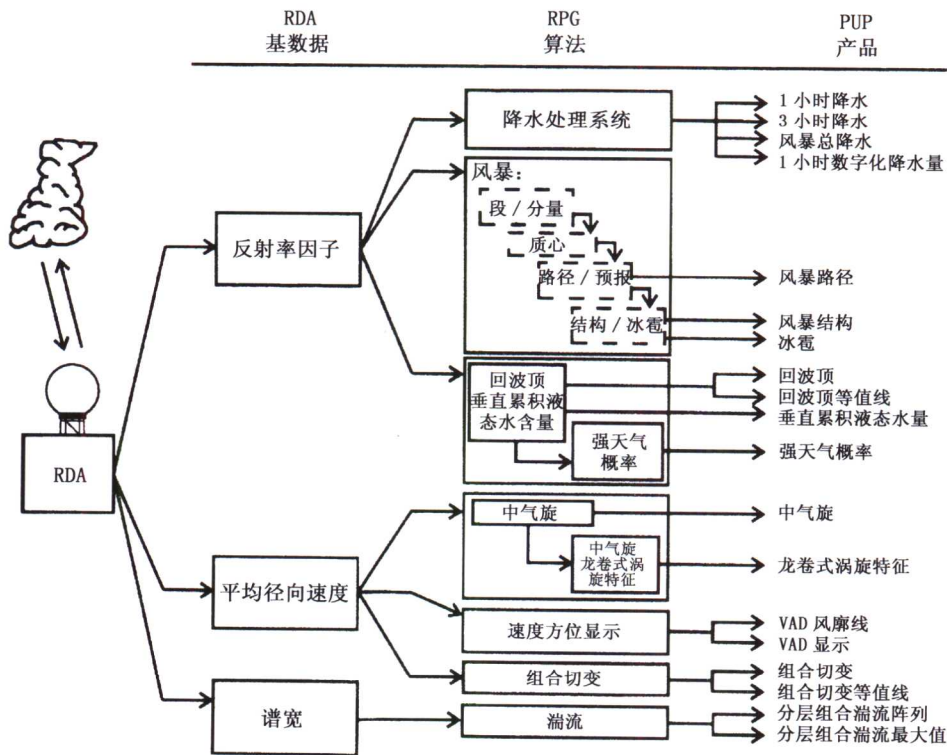


图 1.3 CINRAD-SA 型雷达数据流。由 RDA 的数字化基本数据经过 RPG 中的各种算法生成一系列的产品,通过 PUP 终端显示产品(摘自 Crum 等, 1993,1998)

1.5.1 雷达数据采集子系统(RDA)

RDA 是用户所使用的雷达数据的采集单元。RDA 由四个部分构成:发射机、天线、接收机和信号

处理器。它的主要功能是产生和发射射频脉冲,接收目标物对这些脉冲的散射能量,并通过数字化形成基本数据。CINRAD-SA 型雷达共产生四个级别的数据,RDA 产生其中的两个级别:一级存档数据和二级存档数据。

1.5.1.1 发射机

取得雷达数据的第一步是发射一个射频信号。这主要由速调管放大器(相当于上一代或常规雷达中的磁控管)来完成。该放大器产生一个高功率(峰值功率 750 kW)非常稳定的 10 cm 的射频脉冲。

在这里稳定是非常重要的,产生的每个脉冲必须具有相同的初位相以保证回波信号中的多普勒信息能够被提取。一旦射频脉冲产生,就被送到天线。

1.5.1.2 天线

天线是 RDA 的一个部件,它将发射机产生的射频信号以波束的形式发射到大气并接收返回的能量。天线仰角的变化范围对于 CINRAD-SA 是从 -1 到 90° 天线仰角的设置取决于天线的扫描方式、体扫模式(VCP)和天气模式。雷达操作员不能手动调节天线仰角,天线仰角只能通过上述三要素预设。

(1)扫描方式

扫描方式告诉雷达在一次体积扫描中使用多少仰角和时间。CINRAD-SA 使用三种扫描方式:

扫描方式 #1: 5 分钟完成 14 个不同仰角上的扫描(14/5)

扫描方式 #2: 6 分钟完成 9 个不同仰角上的扫描(9/6)

扫描方式 #3: 10 分钟完成 5 个不同仰角上的扫描(5/10)

(2)体扫模式(VCP)

扫描方式确定一次体积扫中使用多少个仰角,而具体是哪些仰角则由体扫模式(VCP)来规定。CINRAD-SA 可有 20 个不同的 VCP,目前只定义了其中的 4 个:

VCP11 (scan strategy #1, version 1): 规定 5 分钟内对 14 个具体仰角的扫描;

VCP21 (scan strategy #2, version 1): 规定 6 分钟内对 9 个具体仰角的扫描;

VCP31 (scan strategy #3, version 1): 规定 10 分钟内对 5 个具体仰角的扫描;

VCP32 (scan strategy #3, version 2): 确定的 10 分钟完成的 5 个具体仰角与 VCP31 相同。不同之处在于 VCP31 使用长脉冲而 VCP32 使用短脉冲。CINRAD-SA 只定义了 VCP11、VCP21 和 VCP31 三种体扫模式。VCP11 和 VCP21 所用的仰角如图 1.4 所示。

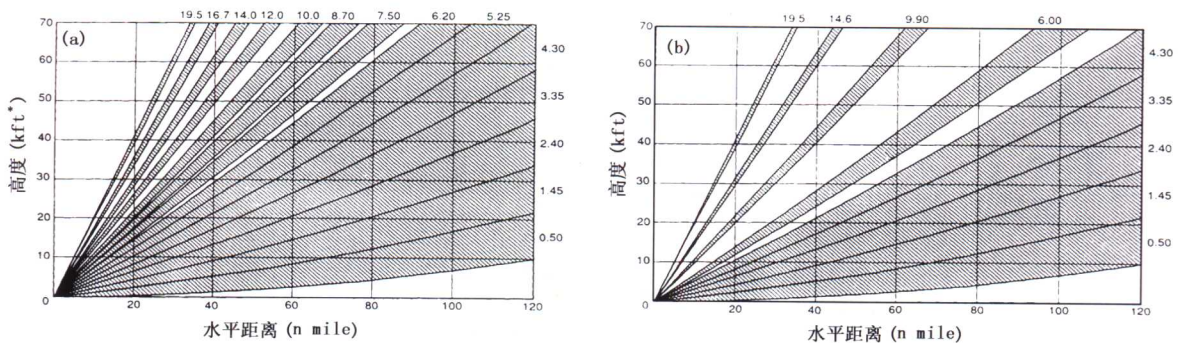


图 1.4 VCP11 (a) 和 VCP21 (b) 所用的仰角

(3)天气模式

CINRAD-SA 使用两种天气模式,即降水模式和晴空模式。雷达的天气模式决定了使用哪种 VCP,而 VCP 又确定了具体的扫描方式。

天气模式 A:降水模式,使用 VCP11 或 VCP21,相应的扫描方式分别为 14/5 和 9/6。

天气模式 B:晴空模式,使用 VCP31 或 VCP32,两者都使用扫描方式 5/10。

* 1 kft=304.8m

1.5.1.3 接收机

当天线接收返回(后向散射)能量时,它把信号传送给接收机。由于接收到的回波能量很小,所以在以模拟信号的形式传送给信号处理器之前必须由接收机进行放大。

1.5.1.4 信号处理器

当接收到接收机传来的模拟信号后,信号处理器完成三个重要的功能:地物杂波消除,模拟信号向数字化的基本数据的转换,以及退多普勒数据的距离折叠。

地面杂波消除:气象目标回波和地物回波的主要区别是地物目标不运动。信号处理器利用目标物运动与否作为主要判据消除地物的回波。

A/D 变换:信号处理器的主要任务之一是将由接收机获取的模拟信号转换成三种数字化的基本数据。它们是基反射率因子、基速度和基谱宽。

退距离折叠:为了精确地测量径向速度,WSR-88D 和 CINRAD-SA 雷达有时采用较高的 PRF(脉冲重复频率)。此时,其最大探测距离较短。雷达可收到位于其最大探测距离之外的目标物的较强回波,并将目标物误认为是位于其最大探测距离之内,从而产生距离折叠。信号处理器的一个重要任务是消除这些折叠,这个处理过程称为退距离折叠。

1.5.1.5 RDA 监控计算机

RDA 系统的实时监控任务由 RDA 监控计算机运行 RDASC 程序来完成。该程序的运行既可以从位于 RDA 的操作维护控制台进行控制(称为本控),也可以从位于 RPG 的雷达控制台 UCP 进行控制(称为遥控)。本控可完成全部的 RDA 监控任务,遥控可完成绝大部分的 RDA 监控任务。

RDA 监控的主要功能包括监测和标定 RDA 硬件、形成 RDA 基数据和信息头数据(时间、仰角和标定参数等)、管理宽带通讯、控制 RDA 和控制信号处理。

1.5.1.6 RDA 内的数据记录

第一级数据:这是指原始的由接收机输出的模拟数据,对这类数据不进行保存。

第二级数据(基数据):CINRAD-SA 雷达二级数据是由信号处理器产生的最高时空精度的高分辨率基数据(反射率因子、平均径向速度和速度谱宽)。这些数据在由各种气象算法进行处理前存储下来。

在有重要天气的情况下,要求将基数据转存到光盘上作为历史数据保存下来。

1.5.1.7 宽带通讯

宽带通讯装置提供 RDA 和 RPG 间的高速双向数据传输。RDA 和 RPG 可同在一处,也可相距几十千米。

1.5.2 雷达产品生成子系统(RPG)

雷达产品生成子系统(RPG)是一个多功能的单元。它由宽带通讯线路从 RDA 接收数字化的基本数据,对其进行处理和生成各种产品,并将产品通过窄带通讯线路传给用户。RPG 是控制整个雷达系统的指令中心。在 RPG 产生第三级数据。

1.5.2.1 产品生成

根据雷达操作员的输入指令,RPG 在体积扫描的基础上产生需要的产品。产品分为基本产品和导出产品。

基本产品:根据从 RDA 接收到的数字化基数据,RPG 可以生成操作员指定仰角上的基本反射率因子、基本径向速度和基本谱宽产品。

导出产品:RPG 也生成导出产品。一个导出产品是由数字化的基数据经过使用特定的算法而得到的。原则上说,除了上述三个基本产品以外的产品都是导出产品。一个导出产品的例子是合成反射率因子。它使用的算法是在所有仰角上挑选每个体积扫描中每一地点上最大反射率因子,并把它们组合成一个联合产品。其他类型的导出产品包括三种基数据的垂直剖面、风暴路径信息(STI)、垂直累积液态含水量(VIL)、回波顶(ET)、冰雹指数(HI)、VAD 风廓线(VWP)、中气旋(M)以及龙卷特征(TVS)等共 33 种。

1.5.2.2 产品分发

产品由 RPG 生成后,它们通过窄带通讯线路传送给各个用户。

1.5.2.3 雷达控制台(UCP)

雷达控制台(UCP)属于 RPG(见图 1.2 和图 1.7),它通过 RPG 计算机实施对整个雷达系统的控制。它具有应用终端和系统控制台的双重功能。应用终端用来发布命令和修正参数。系统控制台允许雷达操作员通过与 RPG 的操作系统的交互来达到文件维护、文件和数据的备份以及软件安装等。CIN-RAD-SA 的 RPG 计算机的界面如图 1.5 所示。

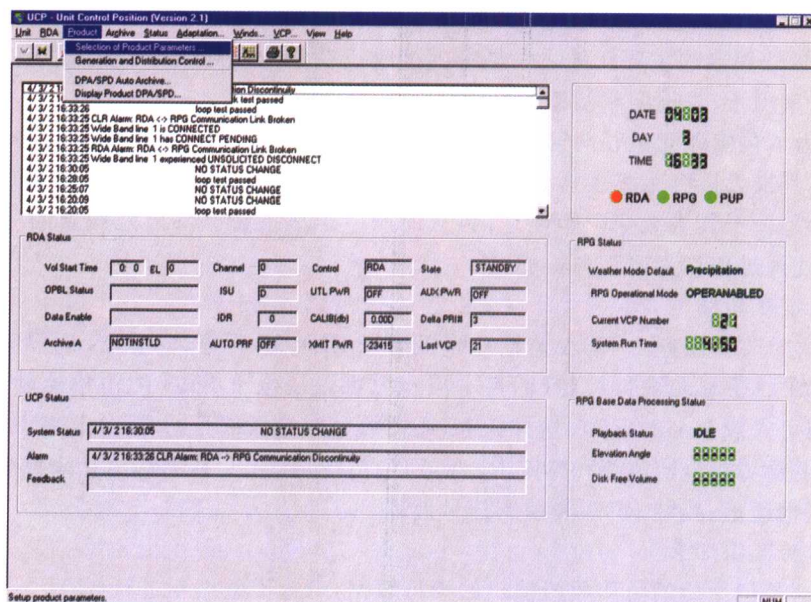


图 1.5 RPG 计算机界面 (UCP)

UCP 可对 RDA(须经 RDA 计算机授权)、宽带通讯和 RPG 进行直接控制,并通过直接控制窄带通讯来间接控制用户。

UCP 对 RDA 的控制包括:

(1) 电源的选择:可选择商业电网或雷达站的发电机作为电源。通常情况下选择商业电网为电源,在电网断电时可转换到发电机作为电源。

(2) 改变体扫模式:UCP 可发布改变 VCP(体扫模式)的指令。省缺的 VCP 有四种:即 VCP11、VCP21、VCP31 和 VCP32。改变 VCP 的指令可使上述四种 VCP 之一成为 RDA 现行的 VCP。这是改变 VCP 和天气模式的通常方法。这一指令发布后,RDA 将把原有的 VCP 完成,然后再执行新的 VCP。

(3) 重新启动体扫:当这一命令发布后,天线停止转动和停止发射,天线回到最低仰角状态。然后,根据最近一次设定的 VCP,体积扫描重新启动。这一指令往往在需要迅速地从 VCP21 转到 VCP11 时或需要立即改变脉冲重复频率时才使用。

(4) RDA 重新启动:这一指令迫使 RDA 处于备用(standby)状态,清洗内存中 RDA 软件,然后再使 RDA 回到运行状态。这一指令在清除软件障碍方面很有用。

(5) 数据传输选择:使用这一指令雷达操作员可以选择 RDA 的三种基本数据传输给 RPG。操作员可以选择全部三种数据(这是通常的情况),也可以一个都不选(维护状态)或三种基本数据的任何组合。

UCP 对 RPG 的控制包括:

(1) 控制通信:连接或断开宽带或窄带通讯线路。在某一用户的线路与 RPG 接通之前,必须在 UCP 对其激活。利用 UCP 将某一通讯线路断开然后再连接的操作可用来清除通讯障碍(如噪声干扰)。

(2) 关闭 RPG:这一指令清除内存中的 RPG 软件,在重新启动时这些软件会重新装入。这一指令可用来消除软件障碍。