

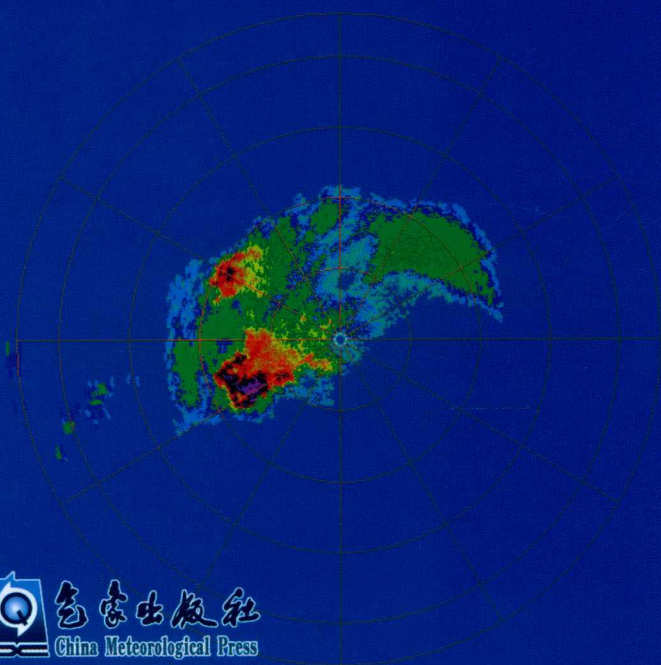


新一代 天气雷达图像分析与应用

XINYIDAI

TIANQI LEIDA TUXIANG FENXI YU YINGYONG

白爱娟 程志刚 编著



气象出版社
China Meteorological Press

新一代天气雷达图像 分析与应用

白爱娟 程志刚 编著



 **气象出版社**
China Meteorological Press

内容简介

本书以新一代天气雷达观测为基础,以雷达图像识别为重点,讲述了天气雷达在天气分析和强天气预报中的应用。首先本书介绍了中国新一代天气雷达的建设和应用情况,讲解了天气雷达的基本探测原理和雷达气象方程的建立过程;其次,阐述了天气雷达的径向速度、反射率因子等基数据的识别方法,分析了雷达基数据和各种物理量产品在识别大气流场、降水云系和天气发展过程中的应用;最后分析了利用雷达资料分析强对流天气的方法和技术,归纳总结了暴雨、冰雹、龙卷和阵风锋等特殊天气的雷达回波特征。

本书可作为本科院校大气科学类专业的教材或教学参考书,也可供从事天气、大气物理、大气探测的技术人员和研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

新一代天气雷达图像分析与应用 / 白爱娟, 程志刚
编著. — 北京: 气象出版社, 2019. 4

ISBN 978-7-5029-6871-7

I. ①新… II. ①白… ②程… III. ①天气雷达-雷
达图像 IV. ①TN959. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 270821 号

新一代天气雷达图像分析与应用

出版发行: 气象出版社

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮政编码: 100081

电 话: 010-68407112(总编室) 010-68408042(发行部)

网 址: <http://www.qxcbs.com>

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

责任编辑: 张 媛

终 审: 吴晓鹏

责任校对: 王丽梅

责任技编: 赵相宁

封面设计: 博雅思企划

印 刷: 三河市君旺印务有限公司

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

印 张: 8.5

字 数: 218 千字

版 次: 2019 年 4 月第 1 版

印 次: 2019 年 4 月第 1 次印刷

定 价: 60.00 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

新一代天气雷达是定量估测区域性降水,监测和预警强对流灾害性天气的重要手段,它对研究降水云体的内部结构,指导人工影响天气作业和防雷减灾等业务,具有十分重要的作用。进入 21 世纪,全国的天气雷达网已经建成,充分应用新一代天气雷达探测数据为短时和临近天气预报提供基础服务,成为气象行业面临的一项紧迫任务,同时各气象院校大气科学类的雷达气象学教材也需要补充新一代天气雷达的内容,增加最新的彩色图像,以满足教学任务的需求。因此,完善雷达气象学的探测原理,整编新的天气雷达探测图像分析方法和应用技术势在必行。

本书介绍了中国新一代天气雷达的建设和应用情况,说明了天气雷达的基本探测原理和雷达气象方程的建立,同时对雷达气象学的基本理论知识进行了简明扼要的讲解,如电磁波的衰减,大气折射和回波涨落等,详细地讲述了新一代天气雷达的径向速度和强度,以及物理量场的生成原理和图像识别方法。本书还讲解了新一代天气雷达的径向速度、强度和物理量产品在识别大气流场、降水云系和天气发展过程中的应用方法。最后本书归纳总结了暴雨、冰雹、龙卷和阵风锋等特殊强对流天气的回波特征。总之,本书以雷达气象学为基础,以新一代天气雷达多种类型图像的识别方法和技术为重点,以雷达图像在天气分析和预报中的应用为目的。

本书简明扼要,内容丰富,深入浅出,图像清晰,可作为高等院校大气科学类及相关专业的本科教材和气象类高等学历教育教材,适合在校 40 多个学时的课堂学习,同时本书可作为大气科学专业专科及气象业务在职培训的教学参考书,并可供气象、航空等部门的科研人员和业务人员参考。本书中所涉及的物理量意义清晰,简明易懂,也便于气象和航空方向的专业技术人员进行自学。

本书在编写过程中,得到成都信息工程大学大气科学学院雷达气象学课程组及许多同事、同学的支持和帮助,并提供了宝贵的图片,本书还收集了许多气象工作者的业务笔记和图像,包括一些不知其名工作者的分析和研究内容,在此对本书提供图片和资料的所有人表示衷心的感谢。由于受编者水平所限,本书可能存在许多不足

之处,敬请大家批评指正。

最后,感谢高原大气与环境四川省重点实验室和国家基金委重点支持项目——青藏高原地—气水热平衡和高原低值系统对东亚夏季风的影响(91537214)对本书的资助。

编者

2018年7月

目 录

前言	
第一章 绪论	(1)
第一节 雷达气象学和中小尺度天气系统简介	(1)
第二节 中国新一代天气雷达的布设和应用	(2)
第三节 新一代天气雷达的基本构成和功能	(4)
第二章 新一代天气雷达的基本探测原理	(10)
第一节 气象目标对电磁波的散射	(10)
第二节 雷达截面、反射率和反射率因子	(15)
第三节 雷达气象方程	(18)
第四节 雷达气象方程的讨论和影响雷达探测的因子	(25)
第五节 多普勒效应和径向速度	(39)
第三章 新一代天气雷达的径向速度图像识别方法	(48)
第一节 新一代天气雷达的数据产品和显示方式	(48)
第二节 大尺度天气系统的径向速度图像识别	(52)
第三节 中小尺度天气系统的径向速度图像识别	(68)
第四章 新一代天气雷达的强度图像识别方法	(76)
第一节 非降水回波的雷达识别	(76)
第二节 雷达强度图像识别降水云	(85)
第三节 雷达的物理量产品分析和应用	(96)
第五章 强对流天气的雷达回波特征	(105)
第一节 区域性暴雨和台风的雷达回波特征	(105)
第二节 中小尺度天气系统的雷达回波特征	(110)
第三节 强对流天气的雷达回波特征分析	(116)
参考文献	(129)

第一章 绪 论

第一节 雷达气象学和中小尺度天气系统简介

Radar, 是 Radio Detection and Ranging 的缩写, 即无线电探测和测距的仪器, 或者无线电探测仪。随着科学技术的发展, 雷达探测技术发展迅速, 从早期为满足军事发展的需求, 到现在在各行各业中都发挥了重要的作用。雷达应用主要行业包括: 军事跟踪、地质勘探、大气遥感探测、医疗和交通等方面, 如今雷达已经是现代化人类生活离不开的重要设备。

气象雷达通过电磁波的发射、传播、散射和接收等物理过程, 根据大气运动和降水生成过程的基本原理, 来探测大气流场和各种天气现象, 是利用无线电技术探测大气的遥感探测设备。应用在气象探测上的雷达有天气雷达、风廓线雷达、声雷达和激光雷达等。这些不同种类的雷达探测大气中各种气象要素的分布、发展和变化特征, 为天气分析和研究提供数据信息。

雷达气象学是利用气象雷达, 研究电磁波与大气相互作用, 进行大气探测的学科, 同时雷达气象学是大气物理学、大气探测学和天气学共同研究的一个分支。雷达气象学是在物理学和天气学的基础上发展起来, 进行大气探测的一门重要学科。

天气雷达或称降水雷达, 是气象雷达的一个重要成员。天气雷达探测大气中云滴和降水粒子的大小、粒子数密度和运动速度, 来确定不同尺度天气系统的位置、降水强度, 以及发展移动变化特征。天气雷达在民航飞行、天气预报、人工影响天气和气象防雷业务上发挥了重要的作用, 是气象行业监测和预警强对流天气, 发布预警信号的重要工具之一。

新一代天气雷达是 20 世纪 90 年代以来在全球范围内最新发展起来的雷达探测系统, 我国在原有雷达观测的基础上, 布设了新一代天气雷达网。新一代天气雷达利用多普勒效应, 除在早期雷达可探测降水系统的回波强度外, 还可探测降水粒子的平均径向速度和径向速度谱宽值, 生成丰富的产品信息, 并用来反映雷达站周边三维的大气流场结构, 为分析天气系统和监测大风等气象灾害提供信息。

天气系统按其空间和时间特征可划分为多种尺度。在国内的日常天气分析中,常把 Orlanski(1975)提出的中- α 系统称为大尺度天气系统,包括气旋、反气旋、锋面、台风,以及高空槽脊等长波系统。这些天气尺度系统的水平尺度一般在几百至几千千米,生命期常达一至几天。把 20~200 km 中- β 尺度的天气现象和天气系统称为中尺度系统,通常是指产生强雷暴和局地强风暴的多单体和超级单体,以及有组织的雷暴或对流系统。这些中尺度系统通常能够产生包括短时强降水、冰雹、飑线等在内的强对流性天气,锋面中的中尺度结构和高低空急流中的大风速中心也属于中尺度系统。此外,把 2~20 km 的中- γ 尺度天气系统称为小尺度系统,包括个别的雷暴积云单体或孤立的小雷暴,以及龙卷等。中尺度与小尺度天气系统相互作用,共存于强风暴等有组织的天气系统中,通常在分析研究中将其统称为中小尺度天气系统。

中小尺度天气系统局地性强,强度大,移动快,变化复杂,经常伴随多种灾害性天气。常规地面和高空观测站上难以监测到中小尺度系统,而高时空分辨率的天气雷达资料弥补了常规观测的不足,可以捕捉到中小尺度天气系统,实现对中小尺度天气系统监测和预警能力。总之,天气雷达是监测、研究和预报中小尺度天气系统的主要工具,是中小尺度天气系统的重要探测手段。

第二节 中国新一代天气雷达的布设和应用

到 2010 年初期,我国已经完成了 150 多部新一代天气雷达的建设,分布如图 1.1,图中包括目前业务运行的雷达,以及建设和纳入规划的雷达站。这些天气雷达按波长可以分为 S 波段(波长 10.7 cm)和 C 波段(波长 5.6 cm)。在我国中东部沿海,以及内陆的川渝地区多强降水发生,统一布设 S 波段雷达。S 波段雷达的穿透能力强,探测距离远,对热带气旋、强暴雨等灾害性天气有强的监测和预警能力。在我国西部、西北部和东北地区,统一布设 C 波段雷达。C 波段雷达的反射能力强,探测距离较近,适用于探测暴雨、冰雹、大风等灾害性天气。

我国布设的新一代天气雷达网,已经成为各地气象防灾减灾的关键手段。这些天气雷达在气象业务部门,主要是用来监测强对流天气,如冰雹、大风、龙卷和暴洪等中小尺度天气系统,包括这些天气系统发生的位置、强度、空间结构,以及持续时间等,还可以用来探测热带气旋、锋面、高低空急流和切变线等大尺度天气系统的移动和发展变化特征。

中国新一代天气雷达具有以下优点:

(1)对灾害性天气有强的监测和预警能力。新一代天气雷达最大探测距离可达 400~600 km,对冰雹、龙卷等中小尺度系统的有效监测和识别距离大于 150 km,而

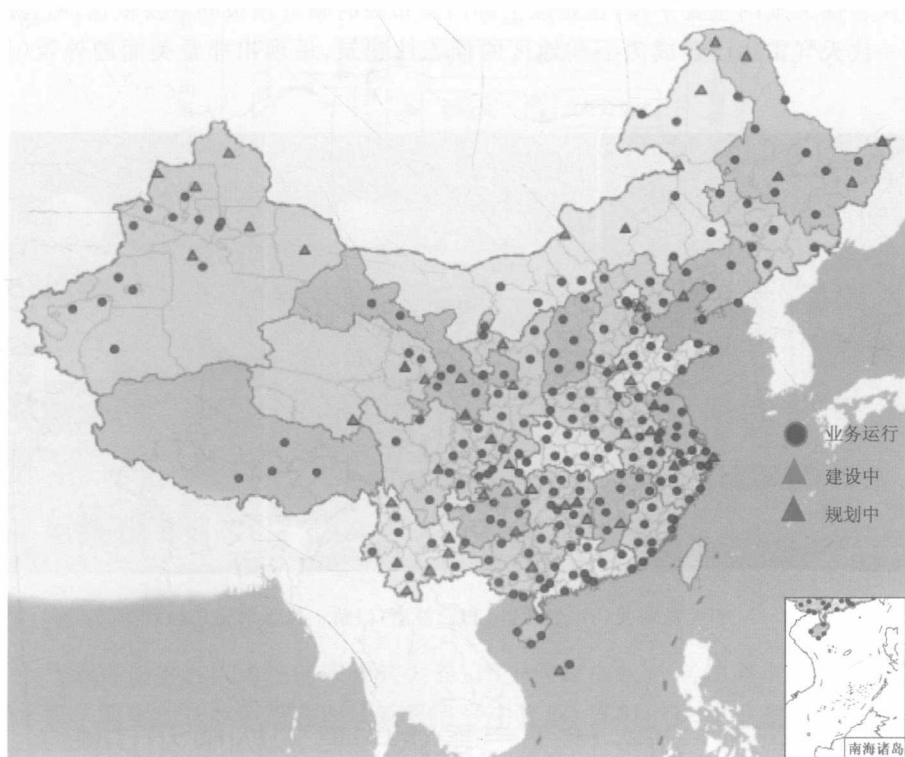


图 1.1 中国气象部门新一代多普勒天气雷达站的分布图

且具有 0.5 km 的空间分辨率和 6 分钟完成一次体积扫描的时间分辨率。

(2) 具有良好的定量测量回波强度的性能。新一代天气雷达能够定量估计大范围降水,监测 0~70 dBZ 的动态回波强度,估测降水的强度范围以及移动特征。

(3) 具有良好的多普勒测速能力。新一代天气雷达能获取降水云体的风场信息,得到较准确的径向风速场分布,从而有助于识别飑线、龙卷和下击暴流等灾害性大风天气,并预测其演变特征。

(4) 属于智能型的探测系统。新一代天气雷达具有丰富的软件支持,能够获取多种信息产品,还能生成多种灾害性天气系统的自动识别和追踪信息,实现对强对流天气的监测和预警。

总之,新一代天气雷达是气象探测业务的重要设备之一。在新一代天气雷达的设计中也充分考虑到了与其他业务系统,如 MICAPS 等,在数据格式、图形产品规格等方面的衔接,具有开放式的良好应用界面。

中国新一代天气雷达是中国气象局大气综合探测的重要项目,是气象、民航部门

监测灾害性天气的主要手段,也是以上部门发布短时临近预报的首要依据。当然,中国新一代天气雷达已经成为一些地区的标志性建筑,呈现出非常美丽的外貌(见图 1.2)。

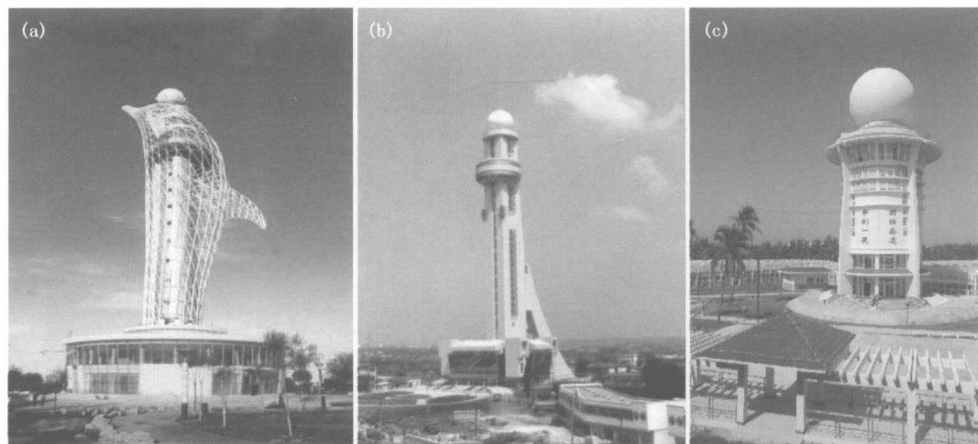


图 1.2 中国嘉峪关(a)、合肥(b)和三沙市(c)新一代天气雷达站外貌图

第三节 新一代天气雷达的基本构成和功能

中国新一代天气雷达与美国的 WSR-88D 雷达相似,是全相干脉冲多普勒雷达。雷达机包含三个工作系统,分别是数据采集系统(Radar Data Acquisition system,简称 RDA),产品生成系统(Radar Product Generation,简称 RPG)和主用户处理系统(Principle User Processor,简称 PUP)。这三个系统既相互独立,系统之间又由网络和通信线路相互连接,各个系统的工作流程如图 1.3 所示。操作人员能便捷地通过网络设备控制雷达机三个组成部分的运行。下面说明雷达机各部分的工作流程和功能。

一、雷达数据采集系统

数据采集系统(RDA)是新一代天气雷达的硬件设备。RDA 的主要任务是产生和发射电磁脉冲信号,通过天线把电磁波信号发送到大气中,并接收返回的电磁脉冲信号,通过信号处理器生成数字化的基数据,完成资料存档任务。RDA 主要由发射机、天线、接收机、信号处理器和系统监控五个部分组成。

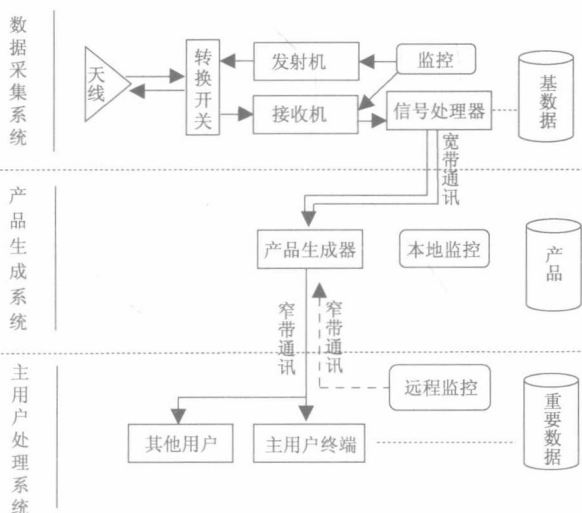


图 1.3 雷达机三个组成系统的结构框图

1. 发射机(Transmitter)

天气雷达的发射机通过速调管放大器,产生固定波长的高功率电磁波。为了保证降水粒子数据信息能够精确地从返回信号中提取,发射的脉冲电磁波稳定度非常高,并且具有相同的初位相。

2. 天线(Antenna)

雷达发射机产生的电磁脉冲,通过天线收发转换开关,先发送到天线处,再通过天线把电磁波发送到大气中。天线还要接收电磁波遇到云、雨等目标物发生散射后返回天线的电磁波信号。为了保证天线的正常运转,新一代天气雷达还配置了球形天线罩。

新一代天气雷达的天线通过体积扫描的方式向大气中发射和接收电磁波。体积扫描的仰角和转动速度取决于天线的扫描方式。新一代天气雷达的天线是具有高度方向性的定向辐射天线,能够使大部分能量集中在狭窄的波束范围内朝一定方向发射。体积扫描的方式是天线选取一定的仰角旋转 360° ,再依次改变仰角,最后完成雷达探测范围内整个大气的三维立体探测,如图 1.4 所示。天线的仰角是雷达发射电磁波束的方向与水平方向的夹角,方位角是天线旋转过程中,电磁波束方向与正北方向的夹角。通常规定正东方向的方位角为 90° ,正南方向为 180° ,依次类推。天线的扫描方式和体扫模式决定一个体扫包含多少个仰角,以及完成一次体扫所需的时间。

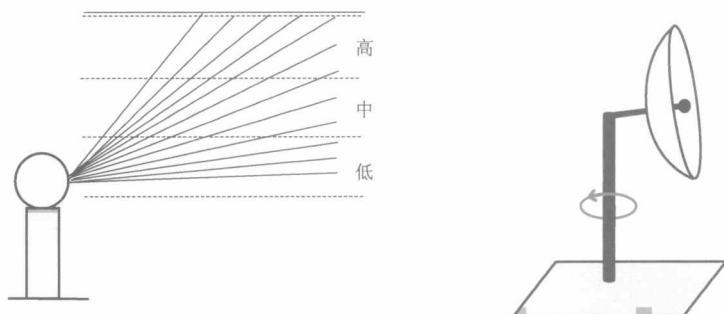


图 1.4 雷达天线的仰角和转动示意图

新一代天气雷达常用的体扫模式有四种,分别是 VCP11, VCP21, VCP31 和 VCP32。其中 VCP11 和 VCP21 为降水模式, VCP31 和 VCP32 为晴空模式。四种体扫模式的仰角如图 1.5 所示。

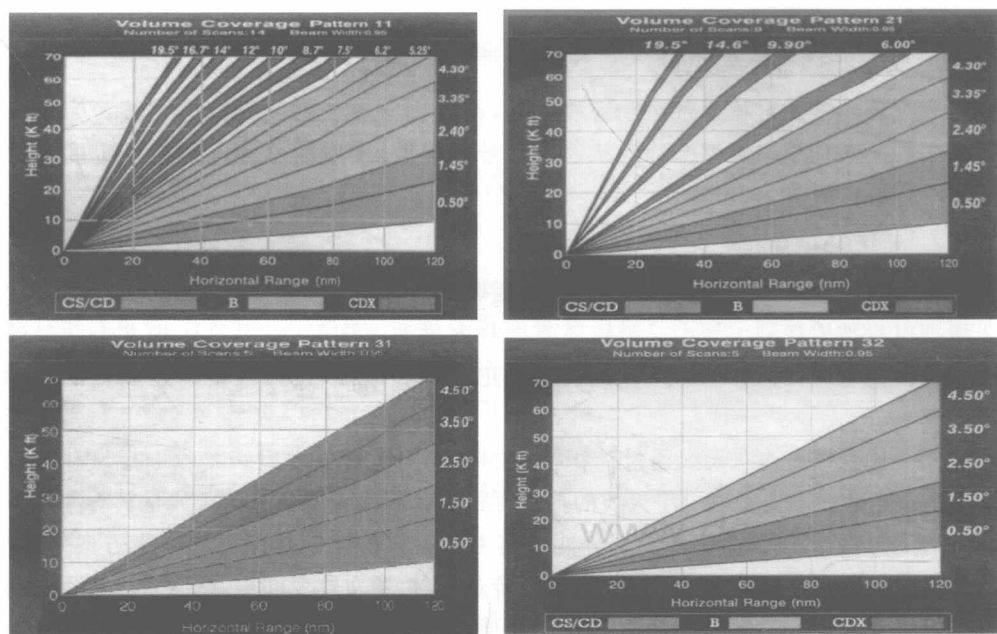


图 1.5 雷达天线的 VCP11、VCP21、VCP31 和 VCP32 扫描模式示意图

VCP11 的体扫模式中,包含 14 个仰角,用时 5 分钟。仰角分别为: 0.5° 、 1.5° 、 2.4° 、 3.4° 、 4.3° 、 5.3° 、 6.2° 、 7.5° 、 8.7° 、 10.0° 、 12.0° 、 14.0° 、 16.7° 和 19.5° 。VCP11 的距离分辨率是 1.0 km。

VCP21 的体扫模式中,包含 9 个仰角,用时 6 分钟。仰角分别为:0.5°、1.5°、2.4°、3.4°、4.3°、6.0°、9.9°、14.6°和 19.5°。VCP21 的距离分辨率是 0.5 km,是天气雷达最常采用的体扫模式。

VCP31 和 VCP32 是雷达在 10 分钟内完成 5 个指定仰角的扫描。两种模式的仰角相同,分别为:0.5°、1.5°、2.5°、3.5°、4.5°。VCP31 是使用长脉冲,VCP32 使用短脉冲,两种模式的分辨率为 4 km。该体扫模式适合天气晴朗,没有天气过程时的探测,可以探测飞鸟、昆虫、森林火灾等非降水特征。

新一代天气雷达的扫描方式选用固定仰角,决定了在探测过程中会出现盲区。低于最低仰角和高于最高仰角之外的探测区域电磁波不能到达,也就无法完成探测,成为探测的盲区。另外,高仰角波束之间的区域,如图 1.5a 和图 1.5b 中红色扫描区中间的黄色区域,不能获取探测数据,也是探测的盲区。

3. 接收机(Receiver)

当雷达天线接收到从云、雨粒子等目标物散射回的电磁波信号后,RDA 会将电磁波信号传递到接收机。由于接收到的电磁波信号能量与发射的电磁波信号相比,功率非常小,所以当接收信号被送到信号处理器之前,还要被放大。

4. 信号处理器(Signal Processor)

雷达从接收机获得电磁波的模拟信号后,进行处理,信号处理器还得到反射率因子的估测值,并通过对脉冲处理得到粒子散射群的平均径向速度和速度谱宽,将完成地物杂波的抑制,模数转换的步骤,获得数字化的基数据,然后传送到数据处理终端,进一步处理和显示。

地物杂波抑制是雷达从回波信号中去除地物杂波的过程。气象回波和地物杂波的主要区别是地物杂波很少或几乎不运动,而气象目标物通常有明显的运动。天气雷达根据径向速度场可以去除地物杂波。同时信号处理器将模拟信号转换为高分辨率的数字化信号,产生数字化的基数据。天气雷达的三种基数据分别是反射率因子 R 、平均径向速度 V 和径向速度谱宽 W 。

5. 系统监控(System Control)

RDA 系统的实时系统监控任务由监控计算机来完成,实现从 RDA 的操作维护控制台进行控制(称为本控),也可以从位于 RPG 的雷达控制台进行控制(称为遥控)。RDA 的系统监控可完成 RDA 的监控任务,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),以及管理雷达的宽带通讯,控制 RDA 和控制信号处理器。

二、产品生成系统

产品生成子系统(RPG)是整个雷达机系统的控制中心,也是雷达机的软件系

统,具有多任务的特点。首先,RPG 通过用户控制平台(User Control Platform,简称 UCP)的软件系统,控制整个雷达机的运行,包括对 RDA 和 PUP 系统进行状态监测。其次,RPG 通过宽带通信线路从 RDA 获取基数据,通过一系列气象学算法生成各种物理量产品和识别产品,用来显示降水系统的特征和发展趋势。此外,RPG 还经过窄带通信线路把基数据和产品发送到指定的用户,完成文件维护,数据存档和备份,以及雷达机的重启等任务。

三、主用户处理系统 PUP

主用户处理系统(PUP)是雷达机的用户终端,该终端通过通信线路从 RPG 获得雷达基数据和产品,进行图像显示和数据存档,其操作界面如图 1.6 所示。PUP 通常由高分辨率的计算机组成,是工作人员操作和显示雷达数据产品的工作平台。PUP 对雷达机的 RDA 和 RPG,以及通信线路等运行情况进行监控,收集、处理和分发雷达数据产品,提供数据记录存档功能。

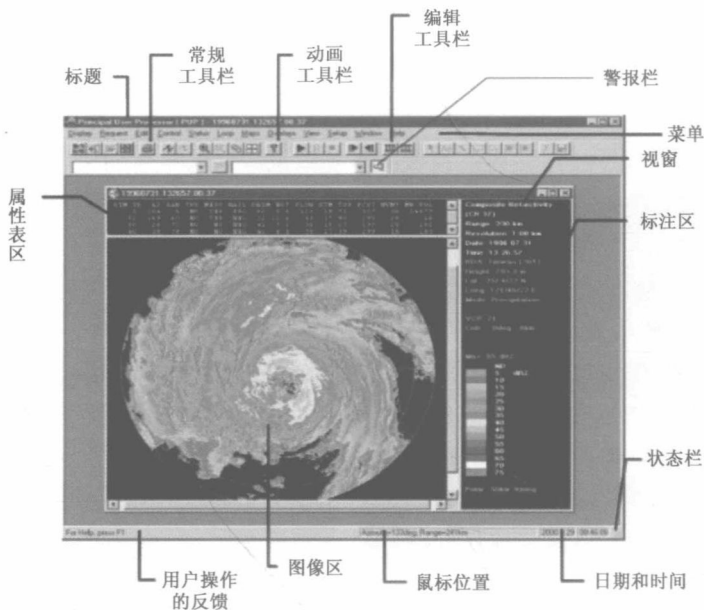


图 1.6 新一代天气雷达 PUP 操作系统的主界面图

PUP 的应用功能如下:

首先,PUP 可以实现对雷达基数据和产品的显示,包括不同产品的请求、编辑、控制、状态显示、动画循环、地图叠加、图像浏览和路径配置等。PUP 还可以实现确

定图像中心,放大、改变分辨率和动画显示图像等多种功能。产品请求菜单是用户通过在 PUP 上设置常规产品集或通过一次性请求,向 RPG 发出产品请求。PUP 还可以通过设置警报区域和警报阈值,根据 RPG 上获取的产品,自动生成警报配对产品。当遇到相应报警的天气条件时,PUP 将显示报警信息。

其次,PUP 可以对雷达机进行远程控制,对雷达机的通信线路进行监视,了解整个雷达机系统的工作状态,实施对 RDA 和 RPG 故障的诊断、排除等。PUP 还不断检查自身与 RPG 的通信线路是否正常。

最后,PUP 可以存储多种雷达数据产品和信息,包括雷达基数据、物理量产品,以及浏览后的图像,以便为本地的天气分析和研究应用提供数据。

课后习题:

1. 什么是雷达,什么是天气雷达?
2. 什么是中尺度天气系统和小尺度天气系统? 中小尺度天气系统有哪些基本特征?
3. 简要介绍中国新一代天气雷达的建设和应用情况,包括布设雷达机的波段,雷达机主要监测的天气系统类型。
4. 介绍新一代天气雷达的三个系统组成部分,说明各组成部分的功能。
5. 什么是新一代天气雷达的体积扫描? 什么是天线扫描的仰角和方位角? 新一代天气雷达有哪些体扫模式?

第二章 新一代天气雷达的基本探测原理

第一节 气象目标对电磁波的散射

天气雷达的探测过程是电磁波的收发过程,雷达机通过天线向大气中发射电磁波束,电磁波束在大气中远距离传播。当电磁波在传播中碰到微小的降水粒子,如气体分子、云滴、雨滴、雪花或者冰雹粒子时,就会发生散射现象。

散射是电磁波束在大气中传播时,遇到大气分子、云滴或者雨滴等悬浮粒子时,入射电磁波从这些粒子上向四面八方传播开来的现象(见图 2.1)。散射开来的电磁波称为散射波。电磁波发生散射后,以散射波的形式向外继续传播,引起电磁波散射现象的物质主要是大气分子、云和降水粒子等。

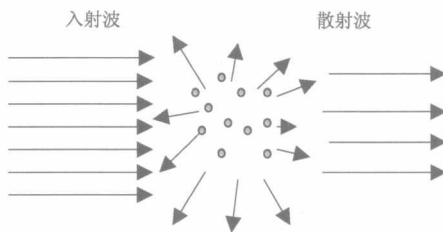


图 2.1 粒子对电磁波散射的示意图

大气分子和降水粒子对电磁波的散射现象,与声波和光波等在大气中发生的散射现象类似。除降水粒子对电磁波的散射外,当大气密度出现明显的不连续时,大气的折射率分布不均匀,也会导致电磁波的传播路径发生改变,引起电磁波的散射现象。

入射电磁波照射到粒子上时,粒子产生极化,感应出复杂的电荷分布和电流分布,这种高频变化的电荷分布和电流分布向外辐射电磁波,就是散射波。粒子对电磁波发生散射时,改变了电磁波的传播方向,不能改变电磁波能量的大小。散射波是全方位,但是散射波能量在各个方向分布不均匀,表现出显著的各向异性。

电磁波散射的分类

粒子对电磁波的散射现象,与入射电磁波的波长 λ 有关,还与粒子的大小、几何形状,以及粒子的电学特性等有关。在此假定发生散射时,降水粒子是理想的,不带电荷的单个球形粒子。当入射电磁波的波长确定后,单个球形粒子发生散射的特征,主要取决于粒子直径 D 和入射波长 λ 的相对大小,引入无量纲数 α ,

$$\alpha = \frac{\pi D}{\lambda} \text{ 或 } \alpha = \frac{2\pi r}{\lambda}$$

式中, r 为粒子半径。

根据 α 的大小,把散射现象可以分为瑞利散射和米散射。

当粒子直径 D 远小于入射波的波长 λ 时,即 $D \ll \lambda$ 或者 $\alpha < 0.13$ 时,发生的散射现象称为瑞利散射,或称为小球形粒子散射。当粒子尺度和入射波长大致相当时,即 $D \approx \lambda$ 时,或者 $\alpha > 0.13$ 时发生的散射现象为米散射。

通常大气中云滴半径只有 $5 \sim 10 \mu\text{m}$,最大不超过 $50 \mu\text{m}$ 。雨滴半径一般为 $0.25 \sim 1.5 \text{ mm}$,其中以 $0.35 \sim 0.45 \text{ mm}$ 范围内最多。大降水粒子的直径可达到厘米量级,但大降水粒子通常会在气流作用下破裂。小冰雹粒子的半径为毫米量级,大冰雹粒子的半径可达到厘米量级。因此,相对于我国布设的厘米波段天气雷达而言,一般的 0.1 mm 量级云滴、雨滴发生的散射,基本满足瑞利散射条件。如果强对流天气发生时出现 1 cm 以上的大冰雹时,粒子对电磁波的散射不再属于瑞利散射,而属于米散射。更确切地说,当降水粒子直径的 13 倍不超过入射电磁波的波长时,粒子的散射为瑞利散射。

1. 瑞利散射的基本特征

不同类型的散射现象发生后,散射波的能量在粒子周围空间的分布不均匀,在不同方向上存在明显的差异,即表现为各向异性。为了分析理想的单个小球形粒子在入射电磁波作用下,散射到各方向电磁波能量的分布情况,引入了散射函数,或称方向函数 $\beta(\theta, \varphi)$ 。

能流密度(S)指单位面积单位时间内发射或接收的电磁波能量,量纲为 $\text{J}/(\text{S} \cdot \text{m}^2)$ 。设 S_i 为入射电磁波的能流密度, S_s 为散射波能流密度。假定粒子发生的散射是各向均匀的,即散射波能量均匀地分布在以粒子为中心的半径为 R 的球面上,球面面积为 $4\pi R^2$ 。该球面任何地方接收到的散射能流密度相同,则根据能量守恒原理,进行以下分析:

$$4\pi R^2 S_s = S_i$$

$$S_s = \frac{S_i}{R^2} \beta$$