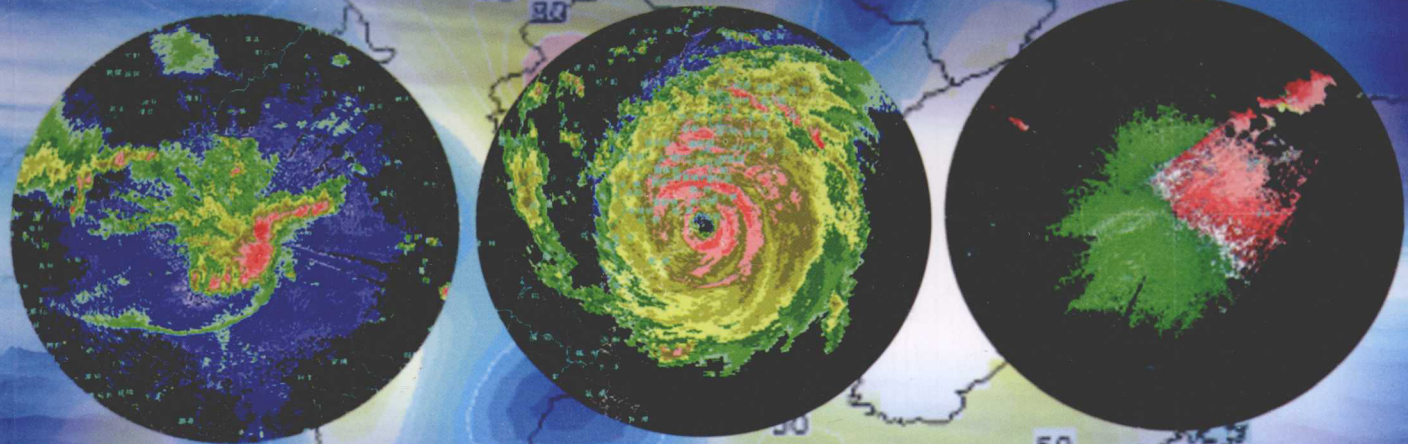


现代气象业务丛书

丛书主编：郑国光




天气雷达及其应用

李 柏 主编

现代气象业务丛书

天气雷达及其应用

主 编 李 柏
副主编 俞小鼎

 气象出版社
China Meteorological Press

内容简介

本书深入浅出地介绍了多普勒天气雷达的基本原理及观测方法,详细阐述了多普勒天气雷达在定量估测降水、强对流天气等方面的业务应用,并对多普勒天气雷达应用的发展趋势和发展方向做了介绍。本书共九章,以新一代天气雷达业务应用为基础,首先介绍了新一代天气雷达的基本原理,系统结构、功能、技术指标和观测模式;其次是多普勒天气雷达数据质量控制,多普勒天气雷达产品与算法,典型天气系统雷达回波特征个例的综合分析,其中天气系统的雷达基本图像识别、天气雷达定量估测降水、强对流天气的天气雷达探测和临近预报、典型天气系统雷达回波特征个例的综合分析是本书的重点;最后对新一代天气雷达应用的发展趋势和发展方向做了阐述。每章后都附有参考文献,以便于查阅和进一步探究。

本书内容充实,讨论深入,适合作为天气雷达、气象业务和科研人员的参考用书,也可作为相关专业人员的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

天气雷达及其应用/李柏主编;俞小鼎等编. —北京:气象出版社,2011. 1
(现代气象业务丛书)

ISBN 978-7-5029-5145-0

I. ①天… II. ①李… ②俞 III. ①气象雷达 IV. ①TN959. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 258133 号

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

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:王萃萃

封面设计:博雅思企划

责任校对:永 通

印 刷:北京朝阳印刷厂有限责任公司

开 本:889 mm×1194 mm 1/16

字 数:743 千字

版 次:2011 年 4 月第 1 版

定 价:86.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:周诗健

责任技编:吴庭芳

印 张:23.5

印 次:2011 年 4 月第 1 次印刷

《现代气象业务丛书》编写委员会成员

主 任 郑国光
常务副主任 许小峰
副 主 任 矫梅燕 高学浩 胡 鹏 李 刚

委 员(按姓氏笔画为序)

王式功 王晓云 刘燕辉 孙 健
宋连春 张人禾 张庆红 张俊霞
李国平 杨 军 杨修群 肖子牛
陈洪滨 赵立成 程建军 端义宏

《现代气象业务丛书》审定专家组成员

(按姓氏笔画为序)

丁一汇 丑纪范 王守荣 伍荣生 宇如聪 许健民
吴国雄 李泽椿 沈晓农 陈联寿 赵柏林 徐祥德
涂传诒 陶诗言 陶祖钰 巢纪平

《现代气象业务丛书》编写委员会办公室成员

主 任 高学浩(兼)
副主任 陈云峰 于玉斌 胡丽云 郑有飞
成 员 章国材 董一平 曹晓钟 刘莉红 俞小鼎
俞卫平 邹立尧 罗林明 董章杭 成秀虎
马旭玲 张 德 赵亚南

《天气雷达及其应用》分卷编写人员

主 编 李 柏

副主编 俞小鼎

撰稿人（按姓氏笔画排列）

刁秀广 邓 志 朱君鉴 刘 娟 刘晓阳

陈大任 宋子忠 李 忱 李 柏 陈荣林

张晰莹 周小刚 周乐照 杨金红 杨洪平

杨馨蕊 俞小鼎 高玉春 高仲辉 高 杰

曹俊武

总序

《国务院》关于加快气象事业发展的若干意见》(国发〔2006〕3号,以下简称“国务院3号文件”)明确要求,新时期气象事业发展要以邓小平理论和“三个代表”重要思想为指导,全面贯彻落实科学发展观,坚持公共气象的发展方向,按照一流装备、一流技术、一流人才、一流台站的要求,进一步强化观测基础,提高预报预测水平,加快科技创新,建设具有世界先进水平的气象现代化体系,提升气象事业对经济社会发展、国家安全和可持续发展的保障与支撑能力,为构建社会主义和谐社会,全面建设小康社会提供一流的气象服务。到2020年,建成结构完善、功能先进的气象现代化体系,使气象整体实力接近同期世界先进水平,若干领域达到世界领先水平。

发展现代气象业务,是气象现代化体系建设的中心任务。为此,中国气象局党组认真总结中国特色气象事业发展改革的经验,深入分析我国经济社会发展对气象事业发展的需求,坚持“公共气象、安全气象、资源气象”发展理念,扎实推进业务技术体制改革,加快推进现代气象业务体系建设,努力实现国务院3号文件提出的实现气象现代化的战略目标,并下发了《中国气象局关于发展现代气象业务的意见》(气发〔2007〕477号)。

现代气象业务体系主要由公共气象服务业务、气象预报预测业务和综合气象观测业务构成,各业务间相互衔接、相互支撑。现代气象业务体系建设要以公共气象服务业务为引领、气象预报预测业务为核心、综合气象观测业务为基础。做好现代气象业务体系的顶层设计,扎实推进现代气象业务体系的建设,是当前和今后一个时期气象现代化体系建设,推动气象事业科学发展的重点任务。而编写一套能够体现现代气象科技水平和成果的《现代气象业务丛书》(以下简称《丛书》),以满足各类从事气象业务、科研、管理以及教育培训等人员的实际需要,是中国气象局党组推进现代气象业务体系建设的具体举措。

《丛书》遵循先进性、实用性和前瞻性的原则,紧密围绕建设现代气象业务体系的总体要求,以适应新形势下气象业务技术体制改革需要和以提高气象业务科技水平和气象服务能力为宗旨,立足部门,面向行业,总结分析了国内外现代气象科技发展的最新成果和先进的业务技术体制与流程。《丛书》的编写过程是贯彻落实科学发展观和国务院3号文件的具体实践,也是科学推进现代气象业务体系建设的重要内容。

《丛书》共计十五分册,分别是《现代天气业务》、《现代数值预报业务》、《现代气候业务》、《气候变化业务》、《现代农业气象业务》、《大气物理与人工影响天气》、《大气成分与大

气环境》、《气象卫星及其应用》、《天气雷达及其应用》、《空间天气》、《航空气象业务》、《综合气象观测》、《气象信息系统》、《现代气象服务》和《气象防灾减灾》。

《丛书》编写工作是在气象部门科研业务单位、高等院校和科研院所以及气象行业管理专家、科技工作者的参与和大力支持下,在《丛书》编委会办公室的精心组织下进行的,凝聚了各方面的智慧。在此,我对为《丛书》编写工作付出辛勤劳动的专家、学者及参与编写工作的单位和有关人员表示诚挚的谢意!

郑国光

2009年12月于北京

前 言

我国是一个气象灾害多发的国家。随着国民经济和社会的快速发展,突发性、灾害性天气对社会经济和人民生活的影响日益加剧,极端天气气候事件增多对农业、水资源、交通、能源、粮食和国防等安全保障带来了极大威胁。因此,如何更有效地监测、预警突发性和灾害性天气是广大气象工作者一项重大任务,而新一代天气雷达是对灾害性天气监测的一种有效探测设备。

天气雷达始于第二次世界大战期间,在经过与电子技术、气象学以及 20 世纪 50 年代后迅速发展起来的计算机技术的不断融合,逐步形成了一门新兴的边缘学科——雷达气象学。

天气雷达自诞生以来,其发展进程大致已经经历了三代:第一代是 20 世纪 50 年代的以电子管技术为主体的模拟信号天气雷达,主要进行定性分析应用;第二代是 60 年代后期,以晶体管技术为主体的数字信号天气雷达,使我们能够开展定量化的分析应用;第三代是 80 年代后期,以集成电路技术为主体的,采用多普勒技术、计算机技术,不仅能够进行量化分析应用,还能获得动力风场信息的新一代多普勒天气雷达。

新一代天气雷达,由于广泛采用了当今的先进的雷达技术、多普勒技术、计算机技术、微电子技术等高新科技成果,从而使其探测能力较以往天气雷达有了很大提高,主要表现在:一是雷达系统灵敏度显著提高,使得对大气中的弱回波探测能力有了明显增强;二是采用多普勒技术不仅获得了极其宝贵的径向风场信息,同时还提高了对地物杂波的抑制能力;三是采用了实时定标检测技术提高了雷达数据稳定性和可靠性,数据质量显著提高;四是采用科学合理的算法,形成应用产品,使得天气雷达应用朝向实时量化方向迈进了一大步。

20 世纪 80 年代以来,广泛使用多普勒天气雷达已经成为国际上大气探测技术发展的新趋势。1998 年中国气象局提出了《关于加强防汛抗洪支持新一代天气雷达网立项建议》,得到了党中央国务院的高度重视。在国家计委的大力支持下,中国气象局利用国债资金,联合各地政府启动了全国新一代天气雷达监测网的建设项目,开始了新一代天气雷达的建设工作。气象工作者以科学发展观为指导,根据我国天气雷达的特点,在沿海省份及主要降雨流域布设 S 波段雷达,内陆地区布设 C 波段雷达,形成了基本覆盖全国主要降水区域的天气雷达监测网,实现了雷达监测布网的科学性和合理性,以及信息与资源的共享。

经过气象人十余年的艰苦努力,在我国已初步建成新一代天气雷达网,该雷达网具有较强的监测和预警灾害性天气的能力,能尽早发现强对流天气的产生和发展,识别和预警飑线、龙卷、下击暴流等造成的风灾,雹暴造成的雹灾以及雨暴造成的水灾和雪暴造成的雪灾,是定位台风中心、分析台风中的螺旋雨带、确定台风移向移速的主要工具。在定量估测降水、临近预报、灾害性天气监测和预警服务等方面发挥着重要作用,显著地提高了我国天气预报的准确率,大大增强了对重大灾害性天气的监测和重要活动的气象服务能力。雷达网具有良好的晴空探测能力,能够获取风暴前环境场的风场信息,有助于对强天气发生、发展的预测,逐步实现精细化的定点、定时、定量预报目标,取得了明显的社会、经济和生态效益。2009 年 8 月 20 日,国家发展和改革委员会正式下发了《关于新一代天气雷达建设增补方案的批复》,明确指出在建成 158 部新一代天气雷达的基础上,再增建 58 部,从而使我国形成一个 216 部新一代天气雷达组成的更为完善的新一代天气雷达网。

随着新一代天气雷达投入业务运行,我国雷达资料应用开始向广度和深度发展,为精细化天气预报(准确、及时、定量、定点)提供有力支撑,为进一步提升我国新一代天气雷达网的监测、预警能力,使我国

短时临近天气预报水平上新台阶。由中国气象局气象探测中心牵头组织了在一线工作的技术骨干和科研教学人员为主的编写组,在气象探测中心、培训中心等单位的鼎力支持下,编者们在夜以继日地辛勤工作,在有限的时间内编写完成了这本《现代气象业务丛书——天气雷达及其应用》。

本书编写大纲由李柏审定;第1章由北京大学刘晓阳编写;第2章由中国气象局气象探测中心高玉春、陈荣林编写;第3章由中国气象局气象探测中心陈大任编写;第4章由黑龙江省气象台张晰莹,福建省气象台邓志、周乐照,山东省气象台朱君鉴,中国气象局培训中心俞小鼎编写;第5章由中国气象局培训中心周小刚编写;第6章由北京大学刘晓阳,中国气象局气象探测中心杨洪平编写;第7章由中国气象局培训中心俞小鼎编写;第8章由福建省气象台邓志、周乐照,安徽省阜阳市气象局宋子忠、刘娟,中国气象局气象探测中心杨金红,山东省气象局刁秀广、朱君鉴编写;第9章由安徽四创电子股份有限公司高仲辉、曹俊武,中国电子科技集团公司第十四研究所李忱编写。

全书由李柏、俞小鼎编审;并由中国气象局气象探测中心杨馨蕊、高杰,安徽省阜阳市气象局宋子忠对全书进行了录入和校审;李柏最后审阅定稿。

编者
2010年3月

目 录

| | |
|--------------|---------------------------|
| 第 1 章 | 天气雷达探测原理/1 |
| | 1.1 电磁波在大气中的散射、衰减、折射/1 |
| | 1.1.1 电磁波在大气中的散射/1 |
| | 1.1.2 电磁波在大气中的衰减/3 |
| | 1.1.3 电磁波在大气中的折射/5 |
| | 1.2 天气雷达测距测速原理/9 |
| | 1.2.1 天气雷达测距原理/10 |
| | 1.2.2 天气雷达测速原理/10 |
| | 1.3 雷达气象方程/11 |
| | 1.3.1 一些重要的雷达参数/11 |
| | 1.3.2 雷达气象方程/13 |
| | 1.4 影响天气雷达观测的若干因素/16 |
| | 1.4.1 地球曲率/16 |
| | 1.4.2 有效照射体积/16 |
| | 1.4.3 测速测距约束/16 |
| | 参考文献/17 |
| 第 2 章 | 天气雷达系统及观测方法/18 |
| | 2.1 天气雷达发展概况/18 |
| | 2.1.1 天气雷达发展概况/18 |
| | 2.1.2 新一代天气雷达(CINRAD)/20 |
| | 2.2 天气雷达系统结构和功能/20 |
| | 2.2.1 雷达数据采集单元(RDA)/23 |
| | 2.2.2 雷达产品生成子系统(RPG)/29 |
| | 2.2.3 主用户处理器(PUP)/31 |
| | 2.2.4 多普勒天气雷达监控与自动标校功能/32 |
| | 2.3 主要技术指标(见附件 1~4)/34 |
| | 2.4 雷达观测模式介绍/34 |
| | 2.4.1 两种基本取样模态/35 |
| | 2.4.2 三种取样方式/35 |
| | 2.4.3 观测模式 VCP11/35 |
| | 2.4.4 观测模式 VCP21/36 |
| | 2.4.5 观测模式 VCP31/36 |
| | 2.4.6 观测模式 VCP32/36 |
| | 2.4.7 雷达站海拔高度对探测的影响/36 |
| | 参考文献/37 |

- 附件 雷达主要技术指标/38
- 附件 1 CINRAD 雷达(S 波段)主要技术指标/38
- 附件 2 CINRAD 雷达(C 波段)主要技术指标/39
- 附件 3 S 波段和 C 波段多普勒天气雷达技术指标差别/41
- 附件 4 711、713 和 714 天气雷达技术指标/41

第 3 章 多普勒天气雷达数据质量控制/42

- 3.1 地物杂波消除/42
 - 3.1.1 普通地物杂波/42
 - 3.1.2 地物引起的虚假回波/42
 - 3.1.3 地物杂波抑制/43
 - 3.1.4 CINRAD/SA、SB、CB 雷达地物杂波抑制的实施/44
- 3.2 非降水回波/46
 - 3.2.1 同频干扰/46
 - 3.2.2 飞机、舰船等回波/47
 - 3.2.3 鸟波/47
 - 3.2.4 海浪回波/47
 - 3.2.5 由天线辐射特性造成的虚假回波/47
- 3.3 退距离折叠方法/48
 - 3.3.1 批处理方法/48
 - 3.3.2 相位编码法退距离模糊的方法/49
- 3.4 退测速模糊的方法/50
 - 3.4.1 用双重复频率(DPRF)扩展多普勒雷达可测速区间/50
 - 3.4.2 软件退速度模糊的原理方法/51

参考文献/52

第 4 章 多普勒天气雷达基本图像识别/53

- 4.1 天气尺度系统的识别与分析/53
 - 4.1.1 雷达回波强度图像的识别/53
 - 4.1.2 多普勒速度图像分析/56
 - 4.1.3 从径向速度图上识别锋面系统/65
 - 4.1.4 台风雷达回波识别与分析/74
 - 4.1.5 温带气旋天气雷达回波图像的基本特征/90
 - 4.1.6 低空急流在天气雷达回波图像上的表现形式/100
 - 4.1.7 辐合线(槽线、切变线)在天气雷达回波图像上的基本特征/103
 - 4.1.8 边界层辐合线的天气雷达回波图像基本特征/105
- 4.2 从天气雷达图上识别中小尺度天气系统/108
 - 4.2.1 飑线的雷达回波特征/108
 - 4.2.2 中尺度对流系统的天气雷达回波特征/111
 - 4.2.3 边界层辐合线的天气雷达回波特征/117
- 4.3 地物和超折射回波特征/125
 - 4.3.1 地物的回波特征/125
 - 4.3.2 超折射回波的特征/126

参考文献/127

第 5 章 产品及算法/128

- 5.1 基本产品/129
 - 5.1.1 PPI 与 RHI 显示/129
 - 5.1.2 基本产品概述/130
 - 5.1.3 反射率因子(R)/131
 - 5.1.4 平均径向速度(V)/132
 - 5.1.5 基本谱宽产品(SW)/134
- 5.2 基数据的格式变换显示产品/135
 - 5.2.1 CAPPI 显示/135
 - 5.2.2 任意垂直剖面产品/135
 - 5.2.3 回波顶高(ET)/138
 - 5.2.4 弱回波区产品(WER)/139
 - 5.2.5 组合反射率因子产品(CR)/140
- 5.3 数据变换及物理量产品/143
 - 5.3.1 相对风暴的平均径向速度图及速度区产品/143
 - 5.3.2 垂直累积液态水含量(VIL)/145
 - 5.3.3 降水处理算法(PPS)与产品/146
 - 5.3.4 速度方位显示(VAD)算法与产品/156
- 5.4 中尺度天气系统及灾害性天气识别产品/159
 - 5.4.1 SCIT 算法与产品/159
 - 5.4.2 冰雹探测算法(HDA)与产品/165
 - 5.4.3 中气旋算法与产品/168
 - 5.4.4 龙卷探测算法(TDA)与产品/171
- 5.5 组网拼图产品/174
 - 5.5.1 拼图原理及拼图策略/174
 - 5.5.2 拼图产品/176
- 参考文献/177

第 6 章 天气雷达定量估测降水/178

- 6.1 雷达估测降水的基本原理/178
 - 6.1.1 雷达估测降水原理/178
 - 6.1.2 Z-I 关系分析/179
 - 6.1.3 雷达估测降水中的误差源/180
- 6.2 雷达定量估测降水方法/181
 - 6.2.1 Z-I 关系法/181
 - 6.2.2 雷达雨量计联合估测降水方法/182
 - 6.2.3 综合方法/185
- 6.3 估测降水系统的实现/185
 - 6.3.1 反射率因子预处理/185
 - 6.3.2 雨量计—雷达数据对的匹配/187
- 6.4 降水估测评估方法/188
 - 6.4.1 评分方法/188
 - 6.4.2 统计方法/189
 - 6.4.3 评估注意事项/190

6.5 雷达估测降水系统(QPEGS)介绍/191

6.5.1 系统组成/191

6.5.2 效果评估/193

参考文献/196

第7章 强对流天气的雷达回波特征及其临近预报/197

7.1 对流风暴的分类及其雷达回波特征/197

7.1.1 对流风暴的分类/197

7.1.2 普通对流单体的演变/198

7.1.3 多单体风暴和飑线/199

7.1.4 对流风暴尺度径向速度特征识别/202

7.1.5 超级单体风暴/203

7.1.6 中尺度对流系统/216

7.1.7 风暴运动/218

7.2 强冰雹的天气雷达探测和预警/218

7.2.1 强冰雹产生的环境条件/218

7.2.2 强冰雹的雷达回波特征/219

7.2.3 强冰雹个例——2006年4月9日夜间湖南永州强烈冰雹/225

7.3 龙卷的天气雷达探测和预警/229

7.3.1 有利于强龙卷产生的背景条件/230

7.3.2 龙卷的多普勒天气雷达探测和预警/231

7.3.3 个例分析:2005年7月30日安徽灵璧F3级强烈龙卷/234

7.4 雷暴大风的天气雷达回波特征和预警/243

7.4.1 弱垂直风切变条件下的雷暴大风/243

7.4.2 中等到强垂直风切变条件下的雷暴大风/250

7.4.3 雷暴大风个例分析/256

7.5 对流暴雨的临近预报/261

7.5.1 造成对流暴雨的主要因子/261

7.5.2 天气雷达在对流暴雨临近预报中的作用/262

参考文献/267

第8章 典型天气系统雷达回波特征个例的综合分析/270

8.1 近海登陆台风雷达回波特征分析/270

8.1.1 2001年热带风暴“百合”/270

8.1.2 2004年热带风暴“艾利”/273

8.1.3 2004年“云娜”台风/276

8.1.4 2007年“珍珠”台风/283

8.1.5 2006年“桑美”台风/289

8.2 梅雨锋暴雨过程雷达回波特征分析/293

8.2.1 2005年7月7—10日的梅雨锋暴雨过程/294

8.2.2 2007年7月7—9日梅雨锋暴雨过程/301

8.2.3 结论/314

8.3 冰冻雨雪/315

8.3.1 冰冻雨雪的形成/315

8.3.2 南方低温雨雪冰冻天气的总体特点/315

- 8.3.3 多普勒雷达探测冰冻雨雪特征分析/316
- 8.3.4 2007年3月中国东部地区的一次大范围强降雪过程分析/318
- 8.4 暴雪/322
 - 8.4.1 冷流暴雪/322
 - 8.4.2 华北大范围暴雪/327
 - 8.4.3 小结/331
- 8.5 地形云降水雷达回波特征和流场分析/333
 - 8.5.1 概况/333
 - 8.5.2 张掖地区地形云降水雷达回波特征/333
 - 8.5.3 地形流场配置/337
- 参考文献/338

第9章 天气雷达及应用的发展趋势/339

- 9.1 发展趋势/339
- 9.2 双偏振技术/340
 - 9.2.1 双偏振雷达测量原理及其优越性/340
 - 9.2.2 双线偏振雷达估测降雨强度/341
 - 9.2.3 利用双偏振雷达探测资料识别降水粒子相态/342
 - 9.2.4 双偏振雷达在人工影响天气中的应用/344
 - 9.2.5 发展双偏振雷达技术探测应思考的几个问题/345
- 9.3 相控阵天气雷达/345
 - 9.3.1 相控阵天气雷达的技术特点/345
 - 9.3.2 相控阵天气雷达的应用/346
- 9.4 脉冲压缩技术/347
- 9.5 相位编码技术/347
- 9.6 气象雷达组网/348
- 9.7 双(多)基地多普勒天气雷达系统/351
- 9.8 网络雷达技术——分布式协同自适应探测网络天气雷达系统(DCAS)/353
- 9.9 毫米波测云雷达/356
- 9.10 机载、星载雷达技术/356
 - 9.10.1 机载雷达/356
 - 9.10.2 国内机载雷达发展阶段/357
 - 9.10.3 星载雷达/357
- 参考文献/358

第 1 章

天气雷达探测原理

雷达是利用电磁波探测目标物距离和特性的无线电设备,散射是雷达探测大气的基础,天气雷达通过检测大气中散射波测定目标物的性质。散射是电磁波照射到折射指数(折射率)*不均匀的物质发生波传播方向改变的现象,其实质是电磁波激发物质内部振动发射次波不能完全地干涉抵消掉。大气中的空气分子、水滴、气溶胶粒子、冰晶等颗粒物会造成散射,大气中折射指数不均匀的湍流块同样也会造成散射。

当雷达发射的电磁波束在大气中传播,遇到空气分子、大气气溶胶、云滴和雨滴等悬浮粒子时,入射电磁波会从这些粒子上向四面八方传播开来,其中一部分向后的散射波要返回雷达方向,被雷达天线接收。水滴、冰晶等大气中粒子散射一定波长电磁波的能力和粒子的大小、形状以及介电特性等有关。雷达根据接收的后向散射电磁波的延迟、振幅、相位、频率、偏振状态等信息,推断相应天气系统,尤其是降水天气系统的内部结构和风场特征。

1.1 电磁波在大气中的散射、衰减、折射

1.1.1 电磁波在大气中的散射

大气中的气体分子、气溶胶粒子、云雨雪粒子等都令电磁波散射,其中,对天气雷达发射的电磁波产生显著散射的是云雨雪粒子,这些粒子对雷达电磁波的散射是天气雷达探测大气的基础。这些粒子散射的能量,在不同方向上的分布是不均匀的,在雷达观测中最关心的是向后方(即向雷达方向)散射的能量,也叫回波功率。描述粒子向雷达方向散射雷达波能力的物理量是雷达截面,也称后向散射截面,雷达截面越大,该粒子向雷达方向散射电磁波的能力越强,雷达越容易接收到回波。粒子后向散射电磁波的能力与粒子的大小、形状、介电特性以及雷达波长等有关。

1.1.1.1 单个粒子的散射

描述粒子散射能力的物理量是散射截面 Q_s ,是粒子产生的散射波总功率 P_s 与入射波能流密度 S_i 之比,即:

$$Q_s = P_s / S_i$$

由于数学处理上的困难,目前只能对圆球形、圆柱形和椭球形等少数几种几何形状比较简单的粒子的散射做出精确的解析解。气象上云滴、雨滴和冰雹等粒子一般可近似地看做是圆球。当雷达波长确定后,球形粒子的散射情况在很大程度上依赖于粒子直径 D 和入射波长 λ 之比。对于 D 远

* 折射指数(refractive index)在物理学中定名为“折射率”,读者仅需记这两者都是 refractive index 的译名,以下文中不再区分。

小于 λ 情况下的球形粒子散射称为瑞利散射;而 D 与 λ 尺度相当情况下的球形粒子散射称为米散射。

在粒子的尺度远小于电磁波波长的情况下,即 $\alpha \ll 1$ 时($\alpha = \pi D/\lambda$),有:

$$Q_s = \frac{2\pi^5 D^6}{3\lambda^4} |K|^2 \quad (1.1)$$

相应的雷达截面 σ 为:

$$\sigma = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 D^6 \quad (1.2)$$

式中

$$K = \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \quad (1.3)$$

其中 m 为构成粒子介质的复折射指数。

云滴的直径通常小于 0.1 mm,几乎对于所有的雷达波长都满足瑞利近似条件($\alpha \ll 1$),雨滴的直径一般在 0.5~3.0 mm 的范围内,强对流性降水的雨滴直径可以超过 4 mm,但最大不超过 6 mm,否则自行破裂。对 10 cm 的波长,6 mm 雨滴直径情况下采用瑞利近似得到的后向散射截面的误差不超过 20%,因此,所有的雨滴在 10 cm 波长(S 波段)情况下都符合瑞利散射条件。对于 5.5 cm 波长的 C 波段雷达,大多数情况下雨滴满足瑞利近似条件,只是在强对流降水情况下,对于可能出现的直径在 3~6 mm 的大雨滴,瑞利近似不能适用。

由式(1.2)可知,在瑞利散射情况下,球形粒子的后向散射截面与粒子直径的 6 次方成正比,与波长的 4 次方成反比。由于云滴的直径很小,后向散射能力很弱,所以传统天气雷达通常观测不到纯粹由云滴组成的云,而新一代天气雷达由于其较高的灵敏度可以探测到云。对同一降水粒子,天气雷达的波长越短,它所产生的后向散射越强。所以,波长较短的 C 波段雷达更容易发现弱的气象目标。波长较长的 S 波段雷达,如果要具有同样的探测能力,则在其他参数相同时,就要采用较大的发射功率。

后向散射截面还与 $|K|^2$ 有关,水球的 $|K|^2$ 值对于 S、C 和 X 波段雷达均为 0.93 左右,冰球的 $|K|^2$ 值为 0.197,所以瑞利散射情况下,冰球的后向散射截面大约只有同样大小的水球的 1/5,这也是干雪回波通常比较弱的原因。

云中的冰晶、雪花和冰雹等,由于与过冷水滴碰并或通过 0°C 层下降而融化时,便成为冰水混合球。冰水混合球可以分为两种:一种是水包冰球;另一种是冰水均匀混合球。当冰粒下降表面开始融化时,或者当冰雹与大量的过冷水滴相碰而来不及立即冻结时,便成为水包冰球;对多孔海绵状冰雹,以及当雪花、雪团下降融化时和在冰球融化的后期,可以看做是冰水均匀混合球。

在瑞利散射适用的范围内,无论是波长 3.2 cm、5.5 cm 还是 10 cm,随着水膜相对厚度的增大,水包冰球的后向散射截面 σ 迅速趋近于同质量水球的后向散射截面 σ_m 。例如,当一个直径为 0.4 cm 的冰球半径的 1/10 融化时,对于 10 cm 波长的入射波,其后向散射截面已接近于同体积水球的 90%。

在米散射适用的范围内,对于一般大小的固态降水粒子,在融化过程中雷达后向散射截面总是增加的。只有当冰球直径超过 8 cm 时,后向散射截面才随着融化而突然减小,但直径超过 8 cm 的冰雹是很罕见的。

1.1.1.2 粒子群的散射

上面讨论了单个粒子的散射,而雷达探测实际大气中的云雨时,接收到的散射是由一群粒子共同构成的。一群云雨粒子的瞬时回波是涨落的,其原因是同时散射能量到天线处的许多云雨粒子之间相对位置不断发生变化,从而使各云雨粒子产生的回波到达天线的行程差也发生不规则的变化,一般雷达都对云雨粒子群瞬时回波取一定时段的平均。可以证明,当粒子间距离大于雷达波长时,粒子群时间平均回波功率等于构成粒子群的各个单个粒子产生的回波功率的总和。

表征粒子群后向散射能力的量是雷达反射率 η ,它是单位体积内所有粒子雷达截面之和,即:

$$\eta = \sum_{\text{单位体积}} \sigma_i \quad (1.4)$$

瑞利散射情况下,上式可写为:

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 \sum_{\text{单位体积}} D_i^6 \quad (1.5)$$

进一步定义雷达反射率因子 Z :

$$Z = \sum_{\text{单位体积}} D_i^6 \quad (1.6)$$

它是单位体积内所有粒子的直径 6 次方的和,该量只和粒子的大小有关,与雷达波长和粒子的电特性无关,因此, Z 值相同的两种粒子群,如果折射指数不同,如分别由水滴和冰晶组成的粒子群,回波功率也不相同,相差可达 5.5 倍, Z 值是气象雷达重要的探测量。

1.1.2 电磁波在大气中的衰减

1.1.2.1 电磁波在大气中的衰减

电磁波能量沿传播路径减弱的现象,称为衰减。造成衰减的物理原因,是因为当电磁波投射到气体分子或云雨粒子时,一部分能量被散射,另一部分能量被吸收而转变为热能或其他形式的能量,从而使电磁波减弱。

由于衰减使回波功率减小,会造成回波的失真。了解衰减对雷达探测的影响,对于正确使用回波资料是十分重要的。

介质对电磁波能量衰减的强弱,与入射电磁波的功率 P 以及传输的距离 dR 成正比,比例系数 k 称为衰减系数,在雷达探测的情况下,雷达发出的探测脉冲要遭受介质的衰减,从目标返回的回波信号又要在途中遭受同样的衰减。即

$$dP = -2kP dR \quad (1.7)$$

因此,经过距离 R 衰减传输后,回波功率为:

$$P = P_0 e^{-2 \int_0^R k dR} \quad (1.8)$$

式中 P_0 为初始没有介质衰减时的回波功率。因此,如果知道电磁波传播路径上介质的衰减系数 k ,就可以计算回波功率的衰减量,从而对接收到的回波功率进行衰减订正。

1.1.2.2 云的衰减

云滴是半径小于 $100 \mu\text{m}$ 的水滴或冰晶。对天气雷达波段来说,它们满足 $\alpha = \pi D/\lambda \ll 1$ 的条件,因此可以采用瑞利近似,理论计算表明,云造成的衰减主要是由于吸收作用引起的。云的衰减系数 k_c (dB/km) 与云区的含水量 M (g/m^3) 成正比,如式(1.9)所示:

$$k_c = k_1 M \quad (1.9)$$

式中 k_1 为单位含水量 ($M=1 \text{ g}/\text{m}^3$) 时的衰减系数,见表 1.1。

表 1.1 不同波长和温度时云的衰减系数 k_1 (dB/km)

| 温度($^{\circ}\text{C}$) | 波长(cm) | | | |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|--------|--------|
| | 0.9 | 3.2 | 5.0 | 10.0 |
| 水 20 | 0.647 | 0.0483 | 0.0215 | 0.0054 |
| 云 10 | 0.681 | 0.063 | 0.022 | 0.0056 |
| 0 | 0.99 | 0.086 | 0.035 | 0.009 |
| 冰 0 | 8.74×10^{-3} | 2.46×10^{-3} | | |
| 云 -10 | 2.94×10^{-3} | 8.19×10^{-3} | | |
| -20 | 2.0×10^{-3} | 5.63×10^{-3} | | |