

江苏高校品牌专业建设工程资助项目资助

SHUANGXIAN PIANZHEN  
DUOPULE TIANQI LEIDA  
TANCE YUANLI YU YINGYONG

# 双线偏振多普勒天气 雷达探测原理与应用

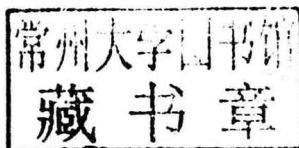
张培昌 魏 鸣 黄兴友 胡汉峰◎编著


 气象出版社  
China Meteorological Press

江苏高校品牌专业建设工程资助项目资助

# 双线偏振多普勒天气雷达 探测原理与应用

张培昌 魏鸣 黄兴友 胡汉峰 编著



 气象出版社  
China Meteorological Press

## 内容简介

目前,国内外正在推广使用双线偏振多普勒天气雷达,从事气象教学、科研以及天气预报、专业气象服务的有关人员,为了能够使用好这一先进天气雷达的资料与应用产品,迫切需要一本水平适中且可以按照需要选读有关章节的书籍。为此,作者编著了既有一定理论分析,又侧重实际应用的《双线偏振多普勒天气雷达探测原理和应用》。本书共分10章,分别介绍了雷达气象基础简介、双线偏振多普勒天气雷达探测与新的物理量、双线偏振多普勒天气雷达数据的质量控制与预处理、双线偏振雷达探测小椭圆粒子群的雷达气象方程、双线偏振多普勒天气雷达探测数据的应用、双线偏振物理量在强对流天气及预报中的应用、多普勒天气雷达径向速度回波分析及风场反演、双线偏振多普勒天气雷达系统结构及功能、双线偏振多普勒天气雷达性能指标与实现等。

本书可以作为高等院校相关专业本科生与研究生的教材或参考书,也可供地方、军事、民航等部门从事天气预报、大气物理、大气探测的技术人员与科研人员在工作中学习与参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

双线偏振多普勒天气雷达探测原理与应用 / 张培昌  
等编著. — 北京:气象出版社,2018.1

ISBN 978-7-5029-6707-9

I. ①双… II. ①张… III. ①多普勒天气雷达-研究  
IV. ①TN958

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第310178号

## 双线偏振多普勒天气雷达探测原理与应用

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](mailto:qxcbs@cma.gov.cn)

责任编辑:黄秀韶 黄红丽

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:北京中新伟业印刷有限公司

开本:710 mm×1000 mm 1/16

印张:20.5

字数:400千字

版次:2018年1月第1版

印次:2018年1月第1次印刷

定价:70.00元

# 前 言

中国自 1999 年生产第一部新一代多普勒天气雷达以来,到 2015 年全国这类业务雷达布网已达二百余部。它们对监测预警各种灾害性天气以及做精细的临近预报发挥了重要的作用,雷达高时空分辨率资料通过反演获得的气象信息可用于天气预报数值模式,特别是强对流中小尺度数值预报模式,已取得很好效果。美国在 20 世纪 90 年代完成 WSR-88D 天气雷达布网后,接着就对今后如何将 WSR-88D 天气雷达升级为双线偏振体制问题开展了十余年的研究和论证,包括雷达硬件升级采用哪种方式,新的双线偏振物理量如何进行质量控制,对基数据做哪些预处理,在新的数字信号处理器中如何生成这些双线偏振物理量等。目前,美国已对 WSR-88D 天气雷达实现了全面升级。当今国内北京敏视达雷达有限公司、安徽四创电子股份有限公司、成都锦江电器制造有限公司、南京恩瑞特实业有限公司、南京大桥机器有限公司、中船重工鹏力(南京)大气海洋信息系统有限公司、北京爱尔达电子设备有限公司等单位,已先后研制并小批量生产了 S、C 和 X 波段不同体制的双线偏振多普勒天气雷达。中国新一代多普勒天气雷达升级成为双线偏振雷达已列入中国气象局气象事业发展规划。同时,南京信息工程大学、中国气象科学研究院、南京大学、中国科学院大气物理研究所、中国气象局武汉暴雨研究所、上海市气象局、安徽省气象局、广东省气象局及厦门市气象局等单位,对双线偏振多普勒天气雷达探测原理、资料质量控制、数据预处理以及在气象业务特别在灾害性天气监测预警等方面的应用问题,分别开展了理论与实际试验研究,并取得许多成果。目前,从事天气预报、专业气象服务等专业以及其他有关科研人员,为了能够使用好先进的双线偏振多普勒天气雷达资料与应用产品,迫切需要一本水平适中并且可以按照需要选读有关章节的书籍。美国 V. N. Bringi 和 V. Chandrasekar 著《偏振多普勒天气雷达原理和应用》这本专著(中文版由李忱、张越译,张培昌校,2010 年 4 月气象出版社出版)是该书作者从事研究与教学成果的结晶,也是目前在极化测量用于气象目标探测方面最系统、全面且理论与工程以及实际应用紧密结合的一本经典之作,它对有关的基础知识、双极化雷达电磁波探测降水粒子的基本理论,从回波信息中获取双极化特征参数的信号处理算法和在气象上的某些应用等,都作了较全面、深入的论述。但由于阅读该书要具有较好的电磁场理论、微波器件、气象目标对微波散射、电子线路技术以及相关的数学基础知识,因此,一般气象业务与科研人员在阅读时会有一定困难。

为此,我们编著了《双线偏振多普勒天气雷达探测原理与应用》这本既有一定理论,又侧重于实际应用的书籍。该书共分10章,分别为绪论、雷达气象基础简介、双线偏振多普勒天气雷达探测与新的物理量、双线偏振多普勒天气雷达数据的质量控制与预处理、双线偏振雷达探测小椭圆粒子群的雷达气象方程、双线偏振多普勒天气雷达探测数据的应用、双线偏振物理量在强对流天气及预报中的应用、多普勒天气雷达径向速度回波分析及风场反演、双线偏振多普勒天气雷达系统结构及功能、双线偏振多普勒天气雷达性能指标与实现。

本书由张培昌负责主编。第1、3、4、5、6章为张培昌所写;第2章由黄兴友编写;第7章2、4、5、6节由魏鸣编写,1、3节由黄兴友编写;第8章由魏鸣编写;第9、10章由张培昌和胡汉峰编写。

本书可以作为高等院校相关专业本科生与研究生的教材或参考书,也可供地方、军事、民航等部门从事天气预报、大气物理、大气探测的技术人员与科研人员在工作中参考。

在本书编著过程中,研究生倪思聪对书中图表、公式、符号的修改以及文字、章节规范化等方面做了许多工作,为此十分感谢他的辛勤劳动。书中引用了北京敏视达雷达有限公司、成都锦江电器制造有限公司、中国气象局气象探测中心、中国气象科学研究院、中国科学院大气物理研究所、中国气象局武汉暴雨研究所、国防科技大学气象海洋学院、上海市气象局、安徽省气象局、广东省气象局及厦门市气象局等单位的一些资料、文件、标书、文献、论文及提供的雷达回波图片等,为此,谨向以上单位表示衷心感谢。同时感谢国家自然科学基金项目(41675029)“双偏振雷达探测降水演变的灵敏性的散射机理研究”和江苏高校品牌专业建设工程资助项目(PPZY2015A016)提供了经费支持。由于编写时间较紧,对文献资料收集及分析不够充分,本书可能会存在一些错误与不足,真诚欢迎读者们能将发现的问题给予反馈,以便再版时纠正与补充。

作者

2017年8月

# 目 录

## 前 言

第 1 章 绪论 .....	( 1 )
§ 1.1 雷达气象发展简述 .....	( 1 )
§ 1.2 双线偏振多普勒天气雷达发展和现状 .....	( 3 )
§ 1.3 双线偏振多普勒天气雷达的若干关键技术 .....	( 4 )
§ 1.4 双线偏振多普勒天气雷达资料的应用 .....	( 7 )
§ 1.5 本书特点及各章内容安排 .....	( 8 )
参考文献 .....	( 9 )
第 2 章 雷达气象基础简介 .....	( 10 )
§ 2.1 气象目标对雷达波的散射 .....	( 10 )
§ 2.2 球形降水粒子的雷达气象方程 .....	( 12 )
§ 2.3 气象目标对雷达波的衰减 .....	( 17 )
§ 2.4 雷达波在大气中的折射 .....	( 20 )
§ 2.5 雷达回波涨落与平均 .....	( 24 )
§ 2.6 径向速度的探测 .....	( 26 )
参考文献 .....	( 32 )
第 3 章 双线偏振多普勒天气雷达探测与新的物理量 .....	( 33 )
§ 3.1 引言 .....	( 33 )
§ 3.2 双线偏振多普勒天气雷达工作方式 .....	( 36 )
§ 3.3 双线偏振多普勒天气雷达能测得的物理量 .....	( 38 )
§ 3.4 信号处理时各个参数估计值的算式 .....	( 43 )
§ 3.5 由模拟降水目标确定双线偏振参数 .....	( 49 )
参考文献 .....	( 52 )
第 4 章 双线偏振多普勒天气雷达数据的质量控制与预处理 .....	( 53 )
§ 4.1 双线偏振天气雷达的雷达气象方程 .....	( 53 )
§ 4.2 $Z_{dr}$ 的质量控制 .....	( 54 )

§ 4.3	$\phi_{dp}$ 的质量控制	(60)
§ 4.4	$K_{dp}$ 的质量控制	(63)
§ 4.5	同时发射时相关系数 $ \rho_{hv}(0) $ 的质量控制	(65)
§ 4.6	雨区中 $Z_h$ 、 $Z_{dr}$ 的衰减订正问题	(66)
§ 4.7	回波的距离折叠与消除	(70)
§ 4.8	抑制地杂波的方法	(81)
§ 4.9	退速度模糊的方法	(89)
	参考文献	(92)
<b>第 5 章</b>	<b>双线偏振雷达探测小椭圆粒子群的雷达气象方程</b>	(94)
§ 5.1	双线偏振雷达探测数据反演 $Z_{dr}$ 的雷达气象方程	(94)
§ 5.2	偏振雷达探测小椭圆粒子群反演 $LDR$ 的雷达气象方程	(100)
§ 5.3	双/多基地双线偏振天气雷达探测小椭圆降水粒子的雷达气象方程	(107)
§ 5.4	双/多基地天气雷达探测小椭圆降水粒子的侧向散射能力	(119)
§ 5.5	双线偏振气象雷达采用固态发射及脉冲压缩时的雷达气象方程	(130)
	参考文献	(136)
<b>第 6 章</b>	<b>双线偏振多普勒天气雷达探测数据的应用</b>	(137)
§ 6.1	用双线偏振变量估测降雨强度	(137)
§ 6.2	用双线偏振变量估测云中含水量	(145)
§ 6.3	用偏振变量识别不同的降水粒子	(147)
§ 6.4	水凝物的模糊逻辑分类法	(150)
§ 6.5	零度层亮带及冻雨识别	(162)
	参考文献	(168)
<b>第 7 章</b>	<b>双线偏振物理量在强对流天气及预报中的应用</b>	(170)
§ 7.1	冰雹的探测	(170)
§ 7.2	中气旋及龙卷涡旋识别	(177)
§ 7.3	龙卷的雷达探测	(181)
§ 7.4	台风涡旋的识别	(186)
§ 7.5	雷达回波用于临近预报	(195)
§ 7.6	双线偏振变量用于中小尺度天气数值预报模式	(216)
	参考文献	(226)
<b>第 8 章</b>	<b>多普勒天气雷达径向速度回波分析及风场反演</b>	(232)
§ 8.1	径向速度回波分析	(232)

§ 8.2	多部多普勒天气雷达的风场反演 .....	(239)
§ 8.3	单部多普勒天气雷达的风场反演 .....	(245)
§ 8.4	本章小结 .....	(258)
	参考文献 .....	(258)
<b>第 9 章</b>	<b>双线偏振多普勒天气雷达系统结构及功能 .....</b>	<b>(261)</b>
§ 9.1	引言 .....	(261)
§ 9.2	天线馈线分系统 .....	(268)
§ 9.3	发射分系统 .....	(271)
§ 9.4	接收分系统 .....	(273)
§ 9.5	信号处理分系统 .....	(276)
§ 9.6	监控分系统 .....	(278)
§ 9.7	伺服分系统 .....	(279)
§ 9.8	雷达的光纤通信分系统 .....	(280)
§ 9.9	数据处理与显示分系统(雷达终端分系统) .....	(281)
§ 9.10	电源分系统 .....	(283)
§ 9.11	整机联系 .....	(284)
	参考文献 .....	(286)
<b>第 10 章</b>	<b>双线偏振多普勒天气雷达性能指标与实现 .....</b>	<b>(287)</b>
§ 10.1	引言 .....	(287)
§ 10.2	双线偏振多普勒天气雷达技术指标与说明 .....	(288)
§ 10.3	保证回波强度精度的措施 .....	(293)
§ 10.4	保证径向速度精度的措施 .....	(300)
§ 10.5	保证 $Z_{dr}$ 、 $LDR$ 、 $ \hat{\rho}_{hv}(0) $ 、 $\phi_{dp}$ 、 $K_{dp}$ 精度的措施 .....	(303)
§ 10.6	发射机性能检测 .....	(304)
§ 10.7	接收机性能检测 .....	(305)
§ 10.8	信号处理器性能检测 .....	(308)
§ 10.9	系统相位噪声测试及相干性好坏检测 .....	(311)
	参考文献 .....	(315)



# 第 1 章 绪论

## §1.1 雷达气象发展简述

气象雷达与雷达气象学,是第二次世界大战期间随着微波雷达的使用开始发展起来的一门新兴技术与学科。从 20 世纪 50 年代开始已有一些发达国家先后建立起了地基天气雷达探测站网,主要用于警戒强对流灾害性天气。20 世纪 60—70 年代,随着半导体技术、数字技术以及计算机技术引入气象雷达,使它形成了一个完整的系统。其主要特征是信息数字化、控制自动化,专门设置了信号处理器、数据处理及图像显示等终端处理设备。20 世纪 80 年代,全相参脉冲多普勒天气雷达开始在多个国家研制成功,其中具有代表性的是美国于 20 世纪 90 年代正式进行业务布网的 WSR-88D 型天气雷达。

20 世纪 50 年代末到 60 年代初,我国在几个气象台安装了从英国及日本进口的 X 波段与 C 波段天气雷达。60 年代末我国自行研制和生产了 711 型 X 波段测雨雷达。70 年代又生产出 713 型 C 波段天气雷达并进行全国正式布网。80 年代研制出具有数字处理系统的 714S 波段天气雷达。到 90 年代又研制生产出 714CD、714SD 型脉间相参多普勒天气雷达。1999 年,成立了中美合资北京敏视达雷达有限公司,公司在对美国 WSR-88D 天气雷达进行改进的基础上,生产出了先进的 S 波段及 C 波段全相参脉冲多普勒天气雷达,接着国内多个单位也生产出了不同型号的 S 波段及 C 波段全相参脉冲多普勒天气雷达,它们已作为中国气象局新一代地基天气雷达投入布网运行。为了对变化迅速的强对流降水目标等能作快速、灵活的电扫描,近十年内,我国又研制生产出采用固态发射、脉冲压缩以及过采样技术的 X、C、S 波段相控阵天气雷达。

另外,星载和机载的微波气象雷达已由多个国家单独或合作研制成功,如 1997 年美日合作发射非太阳同步轨道的 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission),卫星上载有 Ku 波段的常规探测降水的雷达,主要测量热带、亚热带地区大到中等强度的雨。2014 年美日等国又合作发射了拓展到更高纬度、能观测全球降水情况的 GPM(The Global Precipitation Measurement)系统,它由载有双频(Ku 与 Ka 波段)测云雨雷达为核心的主卫星以及 8 个带微波辐射计等仪器的辅助卫星群组成,它的

一个重要的发展就是能够测量小雨( $<0.5 \text{ mm/h}$ )、固态降水和降水的微观结构。

20世纪80年代以来,美国、日本、德国等国还先后研制出Ka和W波段、脉间相干与全相干体制的多普勒测云雷达,有的还装载在飞机及卫星上。我国在21世纪初已生产出Ka与W波段接收双线偏振多普勒体制的测云雷达,并进行机载试验。

雷达气象学的基本内容包括:气象回波形成的理论、探测方法与技术,以及探测资料分析应用等诸多方面。天气雷达探测气象目标的原理有两个方面,一是由降水粒子后向散射形成的雷达回波,其中球形降水粒子散射的理论在20世纪40—50年代已获得圆满解决;60年代Asano推导出了均质椭球形粒子散射的精确解;后来,中国学者对带电的椭球粒子、分层旋转椭球形粒子以及锥球形粒子散射场求得了解析解。至于任意形状降水粒子散射场的近似解及数值解,已有诸如扩展边界条件法和离散偶极子法(即DDA(discrete-dipole approximation)法)等多种方法可以求解,我国学者在这方面也做了一部分研究工作,发表过多篇论文。二是由于晴空大气折射指数不均匀产生的后向“散射”(本质上是衍射)或内反射而形成的晴空回波。在解释这种回波形成机制方面,开始时有多种阐述,到20世纪60年代,苏联学者塔塔尔斯基(В. И. Татарский)发表的《湍流大气中波的传播》理论被许多学者公认是产生晴空回波最合理的解释。

将雷达参数与气象目标参数联系起来的是雷达气象方程。在普遍的雷达气象方程中关键是要确定目标物的雷达截面。Probert-Jones 1961年推导出的雷达气象方程被广泛采用,但它基本上只适用于满足瑞利散射的“小球形”降水粒子。随着定量测量要求的提高以及双线偏振雷达的使用,需要建立各种非球形降水粒子的雷达气象方程,它本质上依赖于对各种形状降水粒子散射解的获得。另外,对雷达气象方程中衰减项的订正,国内外学者对单部单频雷达分别研究出迭代算法、逐库算法等多种方法在一定条件下可获得合理的订正,采用双波长雷达可以获得更好的订正效果。

雷达资料的处理,在采用先进的信号处理、数据处理以及机内自动标校后,既可确保资料的质量,又可与计算机相连接进行运算和处理,其中包括采用新的数字视频积分技术、数字中频采样及数字信号处理技术、消除地杂波及同波长干扰技术、提取多普勒信息有效方法,以及解决测速和测距模糊等技术,典型的有美国Vaisala公司的RVP(Radar Signal Processor)系列数字中频信号处理器。我国国内气象雷达生产厂家和有关单位也已研制出自己的RVP产品供气象雷达使用。

雷达资料应用方面,在参考国外已有成果基础上,我国学者通过理论研究、实际样本积累与分析,已开发出一系列产品。其中包括基数据产品、强对流天气特征识别与跟踪产品、单部与两部多普勒雷达径向速度反演风场及其特征量的产品,以及雷达组网拼图、雷达基数据产品三维立体显示、雷达定量估测区域降水和雷达资料用于临

近预报等方面的技术。随着对雷达资料反演理论与反演技术的发展,我国学者在研究多普勒天气雷达资料与常规气象资料同化并用于中尺度气象数值预报模式方面,也做了许多实例试验与验证工作,并取得了一定进展。

## § 1.2 双线偏振多普勒天气雷达发展和现状

常规天气雷达一般只发射单一的水平线偏振电磁波,并从接收的回波信号中通过反演获取平均回波强度(即雷达反射率因子)、径向速度及速度谱宽这三个基本信息,通过一定的算法形成降水估测、风场反演、强对流天气识别与预警等多种应用产品。双偏振雷达是指可以发射不同偏振状态电磁波的雷达系统,主要有圆偏振雷达和双线偏振雷达。

在 20 世纪 60 年代末 70 年代初,加拿大科学工作者研制成功了高精度双通道收集天线圆偏振天气雷达,并在探测与识别冰雹方面取得重要进展(McCormick, 1968; Barge, 1972, 可参阅梁海河博士论文的参考文献[52]及[6])。这一成功极大地推动了对双偏振雷达的气象研究。但由于圆偏振交叉极化(光学中采用“偏振”,电磁学中采用“极化”,它们是同一个概念)通道返回信号是弱信号,在非强降水区中的水成物信息会受到接收机噪声影响而丢失真实的气象信息,导致偏振参量如差分传播相移和差分反射率的反演出现较明显的偏差(English et al., 1991),而差分传播相移和差分反射率是与降水测量和粒子相态识别紧密相关的两个偏振参量。另外,由于左旋或右旋圆偏振波在降水区传播过程中,会从一种偏振状态向另一种偏振状态转换,当只使用共极化通道(或主通道)估算反射率时,它会被严重地低估(Doviak et al., 1993)。圆偏振雷达测量由于存在以上较明显的不足,使科研人员更多地集中到对双线偏振测量技术的研究上(Zrnica, 1996; Doviak et al., 2000)。美国学者 V. N. Bringi 和 V. Chandrasekar 在所著“Polarimetric Doppler Weather Radar”,对双偏振雷达用于气象目标探测方面作了全面、系统的论述,是理论与工程以及实际应用结合的一本专著,该书以及书后所附大量参考文献可以帮助我们对双偏振雷达探测原理、技术与应用等诸多方面的问题有较深入的了解。

应该指出,双偏振测量技术只有对非球形的云雨等降水粒子群的探测才有实际意义。双线偏振雷达可以通过探测到的原始数据反演出一些新的物理量,如差分反射率因子  $Z_{dr}$ 、双程差分传播相位  $\phi_{dp}$ 、差分相位常数  $K_{dp}$ 、零滞后相关系数  $|\rho_{hv}(0)|$  及退偏振比  $LDR$  等偏振参数,使用这些新物理量可以提高测雨精度和识别冰雹的准确率,了解一定区域内降水粒子相态与形状,确定雨滴谱参数等,并可将这些新物理量用于中小尺度云数值模式,提高预报时效及准确率。

目前,已有一批双偏振气象雷达分布在美国、英国、加拿大、法国、日本、澳大利

亚、意大利、荷兰等国家。美国研究最早,例如:美国国家海洋与大气管理局(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)所属强风暴实验室(NSSL, National Severe Storms Laboratory)的S波段双线偏振多普勒气象雷达 Cimarron 以及X波段双线偏振多普勒气象雷达, NOAA8.66mm波长的椭圆偏振云雷达等。澳大利亚C波段双偏振/多普勒天气雷达 C-POL(工作状态可以在双线偏振和多普勒之间转换)。

美国在全国完成 WSR-88D 天气雷达布网后,紧接着就对升级成双线偏振多普勒天气雷达进行了长达十年左右的研究与试验,现在已全面地将 WSR-88D 天气雷达升级成双线偏振多普勒天气雷达 WSR-88DP。

我国,20世纪80年代兰州高原大气物理研究所将713天气雷达改装成双线偏振天气雷达。90年代末南京第14研究所研制出了X波段双线偏振多普勒天气雷达,同一时期安徽合肥第38研究所也研制生产了C波段双线偏振多普勒天气雷达,成都锦江电器制造有限公司生产了X、C和S波段的双线偏振多普勒天气雷达。2009年开始,中美合资的北京敏视达雷达有限公司向韩国出口了一部S波段双线偏振多普勒天气雷达,以后又向国内外多个用户提供了C及X波段双线偏振多普勒天气雷达。

双线偏振多普勒天气雷达有两种基本体制:(1)交替发射水平(H)与垂直(V)极化脉冲,使用同一个接收机接收共极化信号;(2)同时发射水平(H)与垂直(V)极化脉冲,使用两个接收机分别接收相同的极化信号。对于要求发射功率较大、探测距离较远的S与C波段雷达,由于尚未研制出稳定可靠的大功率极化电子转换开关,故暂时无法采用交替发射体制,一般采用同时发射、同时接收体制。对于X波段雷达,若探测距离要求较近,可采用小功率固态器件发射,发射时通过线性调频使脉冲先展宽,以增加发射的平均功率,接收时再用脉冲压缩技术恢复原来的窄脉冲高空间分辨率。目前毫米波段测云雷达也都采用这种技术。采用固态器件的双线偏振多普勒气象雷达,由于可使用已有的小功率极化电子转换开关,故既可采用交替发射体制,也可采用同时发射、同时接收体制。国内许多单位已研制生产出上述多种体制的双线偏振多普勒气象雷达。至于我国布网天气雷达升级时究竟采用什么体制,要经过十分认真的研究、论证,并做一定对比试验,以确定升级的最优方案。

## § 1.3 双线偏振多普勒天气雷达的若干关键技术

### 1.3.1 双线偏振物理量的质量控制技术

对于同时发射、同时接收体制的大功率S与C波段双线偏振多普勒天气雷达,存在双路天馈线及双路接收机的幅度、相位一致性问题。幅度、相位不一致的原因,

既有雷达双路中各种器件性能指标存在差异所造成,也有被探测的气象目标回波信号统计特征以及环境因素造成的。例如,组成双路天馈线内各路相同器件的长度、衰减度、相移情况不一致,以及正交模耦合器的隔离度不够等均会产生  $Z_{dr}$ 、 $\phi_{dp}$  的误差。同样,双路接收机由于噪声系数、增益等不一致性造成信噪比差异,也会产生  $Z_{dr}$ 、 $\phi_{dp}$  的误差。

针对上述误差,不同学者曾提出了一些测试和校正的方法。例如,对于  $Z_{dr}$  在双通道中存在的幅度、相位差异,首先可以采用设置在天线座上的两个功率监视器,实时监测两个发射支路的能量,并将数据传到主控计算机参与系统定标。双路接收通道中安装的幅度与相位调整模块,可以对双接收通道中幅度、相位差异进行测试与校正。对校正后还存在的误差,可分别用太阳法、系留气球带金属球法以及利用自然云雨目标做垂直探测等方法加以确定后修正。

回波信号统计特征带来误差,原因是个别样本在水平(H)和垂直(V)偏振时经相位检波后输出的  $I$ 、 $Q$  值本身就有涨落,这就使得由  $I$  和  $Q$  序列决定的  $\phi_{dp}$  值在零值附近出现波动,从而引入了  $\phi_{dp}$  误差。双接收机相噪不一致,特别是频综频率稳定度差异也会带来虚假的  $\phi_{dp}$ 。另外,包含在  $\phi_{dp}$  中的后向散射差分相移  $\delta$  值会随着雨滴尺寸的增大而增大,当有效照射体内存在大小不同的粒子群时,不同大小粒子的  $\delta$  值产生叠加,叠加值因存在干涉而出现波动,从而导致  $\phi_{dp}$  的波动。这可以通过取相邻  $N$  个距离上  $M$  组时间样本进行平均获得估算值  $\hat{\phi}_{dp}$ ,以减小随机测量误差。

另外,由于在雷达有效照射体内有时会受到杂波和噪声干扰使  $\rho_{hv}$  值变小,故对  $\rho_{hv}$  值需要使用与信噪比有关的公式进行校正。

### 1.3.2 双路接收机恒温控制技术

要使两部接收机噪声系数相等且稳定,首先要让接收机环境温度  $T_0$  恒定。频综也需采用恒温控制,以保证各种输出频率的稳定。有效控制恒温的方法是采用具有拍耳帖(Peltier)效应的半导体致冷片。所谓拍耳帖效应,是指当电流流经两个不同导体形成的接点时,接点处会产生放热和吸热现象。若接收机温度高于设定的恒温温度  $T_0$  时,就让半导体致冷片组成的温控器的冷端与接收机接触,使接收机放热后降至设定的温度;若接收机温度低于设定的恒温温度  $T_0$  时,通过改变温控器电流方向,就可使半导体致冷片组成的冷端变成热端与接收机接触,使接收机吸热后升至设定的温度。一般双接收机放在一个铝盒内,实现这一技术的关键是要根据双接收机的热容量,确定半导体致冷片的数量(即需要多大功率),同时根据温控的精度要求,设计好驱动电路与控制电路。

### 1.3.3 双线偏振物理量的衰减订正技术

Bringi 等(1990)通过散射的数值模拟表明:衰减率  $A_h$  和差分衰减率  $A_{dp}$  ( $A_{dp} =$

$A_h - A_v$ ,  $A_{hh}$ ,  $A_{vv}$  分别为水平与垂直偏振波在降水区中的衰减率, 单位:  $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$ ) 与  $K_{DP}$  之间基本上为线性关系。因此, 可利用  $K_{dp}$  或总差分传播相移  $\phi_{dp}$  来表达在雨中距离雷达为  $R$  (单位:  $\text{km}$ ) 处的总双向水平反射率因子衰减订正值  $\Delta Z_h(R)$  和差分反射率因子的差分衰减订正值  $\Delta Z_{dr}(R)$ 。

### 1.3.4 脉冲压缩技术

发射机采用固态器件时, 设置的固态器件发射功率  $\hat{P}_i$  是固定的, 且一般功率值较小。另外, 为了提高探测的空间分辨率, 发射脉冲宽度  $\tau_0$  也比较小, 则发射的能量  $\hat{P}_i \tau_0$  就很小, 从而使平均功率  $\bar{P} = \frac{\hat{P}_i \tau_0}{T}$  变小, 这就难以探测到弱小目标, 特别是远处的弱小目标。因此, 常采用脉冲压缩技术。

所谓脉冲压缩技术, 其实它是先对发射的载频脉冲通过线性或非线性调频进行脉冲展宽(如展宽为  $\tau = N\tau_0$ ,  $N$  为大于 1 的整数), 以增大发射能量, 使平均发射功率也随之增大, 从而使弱小目标也能产生可测到的回波功率被探测到。同时, 在接收回波信号后, 通过脉冲压缩使脉冲宽度又变为原先的窄脉冲  $\tau_0$ , 这样就不会降低原来的距离分辨率  $h_0 = c\tau_0/2$ 。

实现上述过程是依靠将接收到来自长度为  $h = c\tau/2$  的脉冲取样体积  $V^*$  的信号, 输入到一个匹配滤波器(即脉冲压缩网络), 由于匹配滤波器具有与扩频的发射(或接收)信号在相位上共轭的特性, 故使经匹配滤波器(即脉冲压缩网络)输出的信号, 又被压缩成窄脉宽  $\tau_0$  的信号, 距离分辨率又提高为  $h_0 = c\tau_0/2$ , 并且由于发射能量增大, 使回波能量幅度也变大。

### 1.3.5 小旋转椭球条件下反演 $Z_{HH}$ 、 $Z_{VV}$ 及 $Z_{VH}$ 的雷达气象方程

常规天气雷达一般发射水平偏振波, 当用它探测小球形降水粒子群时, 经常采用 J. R. Probert-Jones 推导出的雷达气象方程。但对于较大的雨滴, 理论与实验均证实为非球形粒子, 一般可以近似看作旋转椭球形粒子; 由于雷达探测的是在有效照射体内的一群近似看作旋转椭球形粒子, 故还应考虑它们的旋转轴在空间的取向问题。在 V. N. Bringi 和 V. Chandrasekar 所著的“Polarimetric Doppler Weather Radar”一书中, 给出确定差分反射率因子  $Z_{dr}$  的公式使用的是  $\eta_{dr} = 10\lg(\eta_{hh}/\eta_{vv})$ , 其中  $\eta_{hh}$  和  $\eta_{vv}$  是天气雷达发射水平偏振与垂直偏振波时获得的共极化反射率, 它们还与雷达波长等有关, 而且没有考虑降水粒子群旋转轴在空间的取向和雷达常数  $C$  如何处理等问题。我们希望  $Z_{dr}$  这个量仅仅反映降水粒子自身的形状、相态及轴取向特点等, 因此, 把上式写成  $Z_{dr} = 10\lg[Z_{hh}/Z_{vv}]$  更合理, 这样才能用  $Z_{dr}$  这个量作为识别降水粒子性质的依据。因此, 需要推导出能反演  $Z_{hh}$  和  $Z_{vv}$  且适用于旋转椭球形粒子群的雷达气

象方程,以便可用于确定符合定义的  $Z_{dr}$ 。对于  $LDR = 10 \lg(Z_{vh}/Z_{hh})$ ,同样需要先推导出能反演  $Z_{vh}$  且适用于旋转椭球形粒子群的雷达气象方程,以便可用于确定符合定义的  $LDR$ 。在符合小旋转椭球形粒子条件下。张培昌等已完成对上述三个雷达气象方程的推导,详见本书第五章。

## § 1.4 双线偏振多普勒天气雷达资料的应用

### 1.4.1 用双线偏振变量估测降雨强度

单偏振天气雷达,利用  $Z_{hh} - I$  关系估测降水强度  $I$  时,由于  $Z_{hh} - I$  关系随雨滴谱型变化较明显,使其普适性较差,而且假定雨滴是球形的,忽略了雨滴非球形带来的影响,故其测雨精度不高。采用双线偏振多普勒天气雷达后,使用  $Z_{hh}$  与  $Z_{dr}$ 、 $K_{dp}$  等双线偏振变量经统计回归可以建立几种测雨方程,由于这些双线偏振变量对雨滴谱变化相对说来较不敏感,又考虑了雨滴非球形的影响,所以可提高测雨精度。在建立上述方程时,方程中的系数必须通过本地双线偏振雷达探测到的、具有较大动态范围的双线偏振参数序列,以及相应的地面雨量计资料进行统计回归后得到。

### 1.4.2 用双线偏振参量 $K_{dp}$ 、 $Z_{dr}$ 估测云中含水量 $w$

因为  $K_{dp}$ 、 $Z_{dr}$  对椭球短轴与长轴之比  $c/a$  的变化以及雨滴谱分布  $N(D)$  的变化不敏感,故采用  $K_{dp}$  和  $Z_{dr}$  估算雨水含量  $w$  的算法也能提高反演  $w$  的精度。

### 1.4.3 使用模糊逻辑对水凝物分类

模糊逻辑方法对水凝物分类具有许多与生俱来的优势,因为模糊逻辑用简单的规则而不是用公式来描述所感兴趣的系统,所以容易应用于水凝物分类。而且模糊逻辑系统已经发展到可以对重叠的或者“被噪声污染的”数据进行清晰的判决。因此,模糊逻辑方法是一种非常适用于水凝物分类的技术。

模糊逻辑水凝物分类法由 4 个部分组成,即模糊化、规则推理、聚合和去模糊化(Zadeh, 1983, 在 V. N. Bringi 的书所附参考文献中有此文献,可参阅 Bringi 等著《偏振多普勒天气雷达原理和应用》中译本 P435 上)。模糊逻辑水凝物分离器(FHC, fuzzy logic hydrometeor classifier)的方框图如第 6 章图 6.15 所示,其中  $Z_h$ 、 $Z_{dr}$ 、 $K_{dp}$ 、 $LDR$ 、 $|\rho_{hv}(0)|$  和观测高度( $H$ )是 6 个输入量,输出就是水凝物类型( $C$ )。FHC 根据规则库对 6 个输入量进行分析,从而推理出水凝物类型  $C$ ,它们可以是毛毛雨、雨、低密度雪、高密度雪、湿雪、干霰、湿霰、小冰雹、大冰雹等,具体方法及步骤见第 6 章。

#### 1.4.4 双线偏振物理量用于对零度层亮带及冻雨识别

鉴于双线偏振物理量如  $\rho_{hv}$ 、 $Z_{dr}$  等在零度层亮带上反映明显,在零度层亮带以上的降水粒子是液态的冻雨还是固态的冰粒,可以采用上面模糊逻辑对水凝物分类加以识别,同时还可以估算出冻雨层的厚度及含水量等,以便人工影响使冻雨凝结成小冰粒下落而不致形成冻雨灾害。

双线偏振物理量还可用于识别强对流天气中的一些特征,如强风切变、阵风锋、中气旋、龙卷气旋等。模糊逻辑对水凝物的识别结果可以作为输入参数,应用于中小尺度云数值模式。

### § 1.5 本书特点及各章内容安排

目前,从事天气预报、专业气象服务以及有关科研人员,为了能使用好先进的双线偏振多普勒天气雷达资料与应用产品,迫切需要有一本水平适中并且可以按需要选读有关章节的书籍。美国 V. N. Bringi 和 V. Chandrasekar 著《偏振多普勒天气雷达原理和应用》这一本专著(中文版由李忱、张越译,张培昌校,2010年4月气象出版社出版发行),书中对与雷达探测气象目标有关的电磁场基本知识、双极化电磁波探测降水粒子的基本理论,从回波信息中获取双极化特征参数的信号处理算法和在气象上的某些应用等,都做了较全面、深入的论述。但由于阅读该书需要具有较强的电磁场理论知识、熟悉微波器件结构与原理、气象目标对微波散射的定量推导与分析、掌握电子线路技术以及相关的数学基础等,因此,一般气象业务与科研人员在阅读时会存在一定困难。为此,我们编著了《双线偏振多普勒天气雷达探测原理与应用》这本既有一定理论,又侧重于实际应用的书籍。本书共分十章。第1章绪论,该章概述了雷达气象与双偏振多普勒天气雷达的发展与现状,以及双偏振多普勒天气雷达的一些关键技术与应用。第2章雷达气象基础简介,扼要介绍降水粒子对雷达波的散射、衰减,大气对雷达波的折射,球形粒子的雷达气象方程,雷达回波的涨落与平均,以及多普勒雷达信号分析。第3章双线偏振多普勒天气雷达探测与新的物理量,该章在简要介绍双线偏振多普勒天气雷达探测原理后,着重阐述新引进的一些双线偏振物理量的定义、物理意义以及在信号处理器中的算法。第4章双线偏振多普勒天气雷达数据的质量控制与预处理,该章首先介绍了对  $Z_{dr}$ 、 $\phi_{dp}$ 、 $K_{dp}$  以及  $|\rho_{hv}(0)|$  等物理量的质量控制方法,接着对  $Z_{hh}$  和  $Z_{dr}$  在通过雨区时的衰减订正、退距离和速度模糊以及抑制地杂波的方法等进行了阐述。第5章双线偏振雷达探测小椭球粒子群的雷达气象方程,该章着重推导出能考虑小旋转椭球粒子群空间取向以及能反演出  $Z_{hh}$ 、



$Z_{vv}$ 及 $Z_{vh}$ 的雷达气象方程组,以便获取符合定义的 $Z_{dr}$ 、 $LDR$ 这些双线偏振量;同时,还介绍了双/多基地双线偏振天气雷达探测小椭圆降水粒子群的雷达气象方程组和降水粒子的侧向散射能力,对相控阵固态发射与脉冲压缩体制的气象雷达方程也作了介绍。第6章双线偏振多普勒天气雷达探测数据的应用,主要介绍双线偏振变量估测降雨强度和云中含水量,识别不同降水粒子类型与相态,以及识别零度层亮带和冻雨。第7章双线偏振物理量在强对流天气及预报中的应用,包括对冰雹、中气旋、龙卷涡旋、台风等的判别,同时介绍双线偏振变量在临近预报和中小尺度天气数值预报模式中的应用。第8章多普勒天气雷达回波资料反演风场,该章首先介绍单多普勒天气雷达资料反演风场的一些主要方法,接着阐述双多普勒天气雷达反演风场的实用算法。还对双/多基地多普勒天气雷达回波资料反演风场的方法做了仿真试验,最后对采用变分同化方法反演风场做了简介。第9章双线偏振多普勒天气雷达系统结构及功能,这章编写的目的是使读者对双线偏振多普勒天气雷达总体结构及各分系统的组成与功能有一个简要的了解。第10章双线偏振多普勒天气雷达性能指标与实现,这章主要说明为了满足雷达各分系统的技术指标要求,保证实现回波强度、径向速度和各个双线偏振物理量的精度,如何将指标要求分解到各个硬件部分,以及为了评估雷达各分系统是否满足规定的性能技术指标,通常采用的各种测试与定标方法。

## 参考文献

- 梁海河,2003.我国双线偏振多普勒天气雷达方案与设计研究[D].北京:中国气象科学研究院.
- 肖艳姣,王斌,陈晓辉,等,2012.移动X波段双线偏振多普勒天气雷达差分相位数据质量控制[J].高原气象,31(1):223-230.
- 张培昌,杜秉玉,戴铁丕,2005.雷达气象学[M].北京:气象出版社.
- 张培昌,王振会,1995.大气微波遥感基础[M].北京:气象出版社.
- Barge B L,1972. Hail detection with a diversity radar Ph. D. thesis, Dept of meteor[R]. McGill Univ, Montheart, 1-82.
- Bringi V N, Chandraekar V,2010. 偏振多普勒天气雷达原理和应用[M].李忱,张越,译,张培昌,校.北京:气象出版社.
- McCormick G C,1968. Antenna for obtaining polarization-related data with the Alberta hail Pro 13th radar meteor conf[R]. AMS,340-347.
- Zadeh LA,1983. A computational approach to fuzzy quantifiers in natural languages[J]. Comput-Math Appl,9:149-184.