

Radar's Guide For Meteorologists

气象工作者雷达指南

唐万年等

编译

国防大学出版社



气象工作者雷达指南

唐万年等 编译

国防大学出版社

(京)新登字 120 号

气象工作者雷达指南

唐万年等 编译

出版发行 国防大学出版社

印 刷 宁同印务有限公司

开 本 大 32 开 · 10.5 印张 · 220 千字

彩色插页 11

版 次 2004 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

印 数 3000 册

社址:北京市海淀区红山口甲 3 号

邮政编码:100091

联系电话:(010)66769235

传真:(010)66769237

统一书号:5 5626 · 309 (军内发行)

前 言

气象雷达是探测大气的重要工具之一。自 20 世纪 40 年代初美国麻省理工学院设计出气象专用的雷达以来,气象雷达经历了几次大的发展。特别是 20 世纪 60 年代,多普勒技术的采用使气象多普勒雷达应运而生,雷达定量探测大气流场结构、实时处理探测数据和显示图像的能力不断提高。20 世纪 80 年代末,美国国家气象局、联邦航空局和国防部联合研制的美国下一代多普勒天气雷达 WSR—88D,20 世纪 90 年代在世界各地广泛使用;20 世纪末,中国北京敏视达有限公司在 WSR—88D 基础上开发生产的中国新一代多普勒天气雷达 WSR—98D 也畅销国内外。这些雷达使用大量先进的应用软件,可以自动生成和显示丰富多彩的气象产品,提高了雷暴、降水、风切变、下击暴流、龙卷、湍流、冰雹、台风等重大灾害性天气的探测和预测预警能力。

要使气象工作者全面、系统、深入地了解雷达,从而有效地使用气象雷达,需要有优质的能满足各方面需求的雷达工具书。由美国北达科他大学罗纳尔德·E·莱因哈特编著的《Radar For Meteorologists》(第三版),就是一本具有手册性质的优质的气象雷达工具书。该书不仅对雷达的历史、基本理论作了简明的论述,而且对新一代天气雷达的优点及其局限性、多普勒天气雷达的最新技术和有效使用方法作了详细的介绍。为此,我们在阅读和消化理解该书内容的基础上,参阅了近年来国内外大量有关气象雷达和雷达气象领域的最新成果,编译了《气象工作者雷达指南》一书。

本书在编译过程中,本着客观重现气象雷达演变的历史,着重

展现近年来气象雷达的创新成果,充分体现气象雷达发展的时代特征和尽量提供气象雷达操作使用的有效方法等原则,选取了《Radar For Meteorologists》一书的重要内容,同时增加了有关气象雷达理论研究和实践应用方面的最新成果。《气象工作者雷达指南》内容丰富,概念清晰,论述翔实,信息量大,覆盖面广,科学理论与技术实践结合紧密,深入浅出,简明易懂,具有很强的学习查询和操作指导作用,是气象雷达领域具有指南意义的用书。

本书由解放军理工大学唐万年、焦中生、章东华三位教授和苏晓冰副教授、张鹏助教编译。其中,第一章、第二章由唐万年编译,第三章至第七章、第十二章由焦中生编译,第八章、第九章、第十一章由章东华编译,第十章及雷达彩色图例由张鹏编译,附录1~6由苏晓冰编译,丁朝阳、王琼华、陈志军、曹原同志对本书的打印、校对、描图、复制及部分内容的翻译做了大量工作。全书统稿及审核由唐万年教授完成。

本书可作为从事大气科学、气象雷达工程、海洋科学工作者的参考书,也可作为上述学科的本科生和部队在职气象干部继续教育的教学用书。

由于我们水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编译组

2004年2月22日

目 录

第一章 概论	(1)
1.1 雷达的历史	(1)
1.2 雷达是怎样工作的	(3)
1.3 雷达的类型	(6)
一、单基与双基雷达	(6)
二、连续波与脉冲雷达	(7)
三、多普勒雷达	(8)
四、航空雷达	(9)
第二章 雷达硬件	(13)
2.1 雷达的基本组成和发射机	(13)
2.2 调制器和主时钟/计算机	(15)
2.3 波导	(16)
2.4 天线	(20)
2.5 收发开关和接收机	(28)
2.6 显示器	(30)
第三章 电磁波	(35)
3.1 电磁波频谱	(35)
3.2 折射指数与折射率	(38)
一、折射指数	(38)
二、折射率	(39)
三、斯涅尔定律	(43)

3.3	雷达波的传播路径	(44)
一、地球曲率效应	(44)	
二、超折射与大气波导	(47)	
三、负折射	(48)	
四、标准折射	(48)	
3.4	电磁波传播衰减的影响	(49)
一、传播衰减对雷达最大探测距离的影响	(50)	
二、传播衰减对回波功率的影响	(51)	
第四章	点目标的雷达方程	(52)
4.1	点目标的雷达方程	(52)
4.2	目标后向散射截面积	(55)
一、球形目标	(55)	
二、标准目标	(57)	
三、几种典型目标的后向散射截面积	(59)	
第五章	雷达气象方程	(64)
5.1	独立采样与雷达采样体积	(64)
一、独立采样时间	(65)	
二、采样体积	(67)	
5.2	云和降水的雷达气象方程	(68)
一、 σ_r 形式的雷达气象方程	(68)	
二、 D^6 和 Z 形式的雷达气象方程	(70)	
三、考虑衰减因子的雷达气象方程	(72)	
四、雷达气象方程主要因子分析	(73)	
5.3	反射率因子	(77)
一、反射率因子的线性值和对数值	(77)	
二、等效雷达反射率因子 Z_e	(78)	

三、利用雨滴谱求取反射率因子	(79)
第六章 多普勒速度测量	(81)
6.1 多普勒频移与径向速度	(81)
6.2 多普勒雷达的基本原理	(85)
一、全相参雷达工作原理	(86)
二、中频锁相相参雷达工作原理	(87)
6.3 速度模糊与距离模糊	(89)
一、最大不模糊速度	(89)
二、最大不模糊距离	(90)
三、多普勒雷达 PRF 选择	(91)
6.4 速度模糊与距离模糊的识别	(93)
一、距离模糊回波的识别	(93)
二、速度模糊回波的识别	(97)
三、速度不连续的其它原因	(101)
四、多次回波的地图投影	(105)
第七章 速度谱宽	(107)
7.1 速度谱宽与方差	(107)
7.2 影响速度谱宽的因子	(110)
一、风切变与速度谱宽	(110)
二、天线扫描与速度谱宽	(111)
三、下落速度与速度谱宽	(111)
四、湍流与速度谱宽	(112)
第八章 气象目标	(114)
8.1 云	(114)
8.2 雨	(116)
一、雨滴谱	(117)

二、Z-R 关系	(118)
三、DVIP 强度等级	(119)
8.3 雪	(120)
8.4 亮带	(122)
8.5 冰雹	(126)
8.6 衰减	(128)
一、气体对雷达波的衰减	(128)
二、云对雷达波的衰减	(131)
三、雨对雷达波的衰减	(132)
四、雪对雷达波的衰减	(133)
五、冰雹对雷达波的衰减	(133)
六、衰减的订正	(134)
七、衰减的识别	(135)
8.7 其它气象目标	(136)
第九章 晴空回波	(139)
9.1 晴空回波的来源	(139)
一、大气中的微粒	(140)
二、折射指数梯度	(144)
9.2 可探测的风现象	(146)
一、微下击暴流	(146)
二、阵风锋	(151)
三、湍流	(155)
9.3 地物杂波	(157)
第十章 气象雷达新的应用	(160)
10.1 降水量的测量	(160)
10.2 双波长雷达	(163)

10.3	极化分集	(165)
	一、圆退极化比	(166)
	二、线退极化比	(167)
	三、反射率退极化比	(168)
10.4	双多普勒雷达联合探测	(170)
第十一章	下一代天气雷达	(174)
11.1	美国下一代天气雷达	(174)
11.2	美国机场多普勒天气雷达	(182)
11.3	中国新一代多普勒天气雷达	(184)
第十二章	雷达参数的测量与标定	(188)
12.1	雷达的主要参数	(188)
12.2	时间的测量和校准	(189)
12.3	发射机参数的测量	(190)
	一、定向耦合器	(190)
	二、发射功率	(190)
	三、发射机频率	(193)
	四、脉冲宽度	(193)
12.4	接收机参数的测量与标定	(194)
	一、接收功率	(194)
	二、接收机带宽	(203)
12.5	天线参数的测量	(203)
	一、天线增益	(203)
	二、天线波束方向图	(215)
	三、天线波束宽度	(216)
12.6	定位参数的标定	(217)
	一、距离	(217)

二、方位角和仰角	(220)
三、多普勒速度	(220)
雷达彩色图例	(221)
附录 1 对数单位	(246)
附录 2 误差分析	(255)
附录 3 计算工具	(269)
3.1 圆形计算尺	(269)
3.2 速度计算仪	(273)
附录 4 部分气象雷达主要技术参数	(276)
附录 5 两种空中交通管制雷达性能参数	(279)
附录 6 过滤纸技术	(280)
雷达技术词汇英汉对照表	(291)
参考文献	(322)

第一章 概 论

1.1 雷达的历史

雷达的历史与无线电的历史紧密相连。雷达是英文 Radar 的音译,源于 Radio Detection And Ranging 的缩写,意思是“无线电探测与测距”,即用无线电方法发现目标并测定它们在空间的位置。因此,雷达一词本身就暗示它源于无线电。18 世纪、19 世纪与 20 世纪早期,人类在无线电理论与实践方面一系列新的发现,为把无线电作为一种通信手段创造了条件。

1864 年,英国物理学家麦克斯威尔在总结前人实践经验的基础上,提出了光和无线电波都是电磁波的电磁理论,并计算出无线电波的传播速度和光速相同。1888 年,法国物理学家赫兹通过实验证明了电磁波的存在。他指出,这种无线电波的确同光一样,能够传播且能被金属板所反射。1903 年,法国人赫尔斯迈耶探测到从船上反射回来的电磁波,并进一步发现电磁波的特征与光的特征在许多方面是一致的,能够传播,有反射和折射现象。意大利人马可尼于 1922 年比较完整地论述了雷达的概念,并主张用短波无线电来探测物体。他说:“电磁波是能够为导体所反射的,可以在船舶上设置一个装置,向任何所需要的方向发射电磁波,若碰到导电物体,它就会反射到发射电波的船上,由一个与发射机相隔离的接收机接收,以此表明另一船舶是存在的,并进而可以确定其具体位置”。

到了 30 年代,许多国家几乎同时开始了像雷达这类仪器设备

的研制工作,包括美国、英国、法国、意大利、德国、荷兰、俄罗斯和日本在内。尤其是美国和英国,投入的力量大,研究的成果多。1930年,美国海军研究实验室采用连续波雷达探测到了飞机。1938年,美国无线电公司(RCA)研制出了第一部实用的 XAF 舰载雷达,它对海面舰船的探测距离为 20km,对飞机的探测距离为 160km。1939年,英国在一架飞机上装了一部 200MHz 的雷达,用来监视入侵的飞机,可称得上是世界上第一部机载预警雷达。

使雷达获得成功的一个重要发明是英国伯明翰大学兰德尔和布特发明的发射机磁控管。1940年,英国的科学家在访问美国时向美国人提供了这种磁控管,并建议美国研制微波机载雷达和防空火控雷达。因为有了这种磁控管就可以制造较轻型的雷达,这种雷达使用较高的微波频率,比较低频率、较长波长的雷达系统具有更多的优点。使用这种高频率信号可以大大减小天线的尺寸,使雷达能更准确地测定目标物的方向。

第二次世界大战中,由于战争的需要,人们关注的主要是飞机,因而交战双方都集中了巨大的人力、物力和财力来发展雷达技术。这时,雷达已在海陆空三军中得到了广泛应用,被誉为“第二次世界大战的天之骄子”。尤其是盟军,在这方面更为成功。他们研制的雷达不仅能在各种复杂条件下发现数百千米以外的入侵飞机,而且还能精确地测出它们的位置。

二战期间,军事雷达操作人员还发现雨和雪可以产生清晰的雷达回波。尽管这些回波对军事人员来讲,成了扰乱目标的干扰杂波,但气象学家却从中首次发现了可以用来精确探测大范围降水分布的雷达探测技术。1941年,在英国最早使用雷达探测风暴,自那时起,雷达就成了气象探测的重要工具。1942—1943年,美国麻省理工学院设计出了气象专用的雷达。

第二次世界大战后,世界进入冷战时期,军事竞争推动雷达进入了一个变革式的发展时期。从发射机、天线、接收机、显示器到

信号处理器,雷达所有的部件都得到了改进和提高。其它领域的发明,如晶体管不久也出现在雷达系统中;新型的天线系统,例如由军方研发出的相控阵天线开始投入民用。特别是计算机在雷达中的应用,使雷达从硬件到软件,都有了许多新的发展和进步,通过计算机处理雷达数据来进行雷达自动警报已成为可能。

雷达技术方面的一项重大进步,至少就气象应用而言,是多普勒技术的发展。多普勒雷达不仅能探测并测定来自目标物的能量,而且能测定朝向雷达和远离雷达的目标物速度,即目标的径向速度。如果有不止一个目标物出现在雷达采样体积中,则每一个目标物的速度都将会被测到。在用雷达探测风暴的时候,可能在单个采样体积中有数十亿个雨滴,在此情况下,多普勒雷达虽然不会给出数十亿个不同的速度,但它能测定所有目标物所具有的平均速度,这可以提供采样体积中有关雨滴谱分布的有用信息。利用这一信息和相关的大气运动模式,可以直观地得到大气的风场结构,有利于判别降雨过程和预测预警危险性天气。

战后,雷达的另一个进步是极化信息的利用。我们在以后的有关章节中会看到,有一些雷达具备了探测目标回波信号极化信息的能力,这就能提供被探测粒子,如水或冰的种类、形状与大小的信息。

1.2 雷达是怎样工作的

尽管在第二章中,我们将会更多地了解有关雷达的工作过程,但为了使下节关于雷达种类的讨论更有意义,这里有必要对雷达的工作过程作简要的论述。在此,让我们考察一种典型的气象雷达,因为这是本书首先关注的,其它雷达的工作过程虽多少可能有些不同,但作为雷达都具有某种共性的特征。

雷达基本上由四个主要部件构成:一是发射机,它产生高频信

号；二是天线，它将高频信号辐射到空间并接收从目标物返回的回波信号；三是接收机，它接收回波信号并将它放大到足够有用的幅度；四是显示系统，它能向人们显示雷达探测的结果。

早期雷达通常使用一个发射机连续不断地产生信号，为此，发射机与它自己的天线连接，接收机则与另一个天线连接。而发射天线与接收天线之间常常相隔一定的距离，从而使发射信号不会对接收机造成过强的能量冲击。图 1.1 显示的是一个探测电离层的双基雷达。

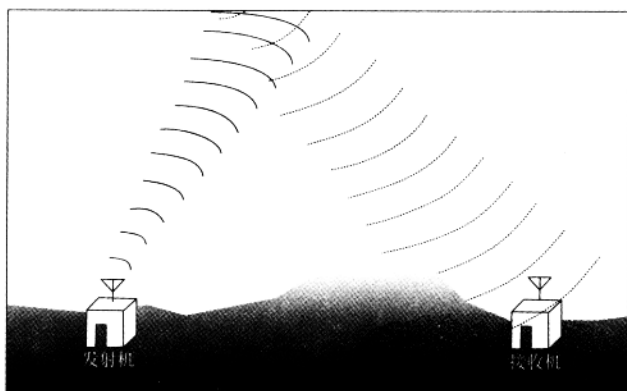


图 1.1 从一地发出信号并在另一地接收信号的双基雷达

现代气象雷达使用一个天线，雷达发出短脉冲能量，然后等一会儿，以便信号能以光速传播，碰到目标并返回天线。经过适当的等待，再发出另一个脉冲，这样一个接着一个，如此反复。能量以光速传播，可以在不太长的时间里使信号传送数百千米。

雷达天线通常围绕一个垂直轴线旋转，对雷达站周围地区进行全方位水平扫描。即使天线可能以 $10^\circ/\text{秒}$ 到 $70^\circ/\text{秒}$ 的速度进行扫描（高达 10 转/分钟或更快），然而光速还是要快得多，一个雷达信号仅花 2 毫秒就可以传出 300 千米并返回。假如天线以 10

转/分钟的速度旋转,那么天线在这段时间的转动将不超过 $1/10$ 度。所以,从人的视觉角度讲,信号发射和返回,可近似认为天线是静止不动的。雷达重复发射或接收信号的次数,每秒可达几百到几千次。因此,我们只注意到天线平稳地、相当快速地转动,而不知道这样一个事实:雷达的信号以人脑几乎难以想象的速度传播很远的距离并返回。我们往往看到随着雷达扫描线在显示屏上向前扫描,流畅地描绘着雷达的回波,这看上去似乎很简单,但实际上雷达所做的工作比我们所看到的要复杂得多。

气象雷达还可以使其天线在水平线以上扫描。如果我们想测定风暴有多高,或探测地面以上回波,这么做是非常有用的。有些雷达以所谓的体扫描方式进行工作,天线以某个仰角做一个圆周扫描,然后向上倾斜一度或两度,再做一次圆周扫描。通常天线要进行多达 10—20 个不同仰角的扫描,然后在大约 4—6 分钟的时间里重复整个圆周扫描。这样做,就能对雷达周围区域进行完整的立体扫描,采集到有关风暴垂直结构及其分布很有用的数据。

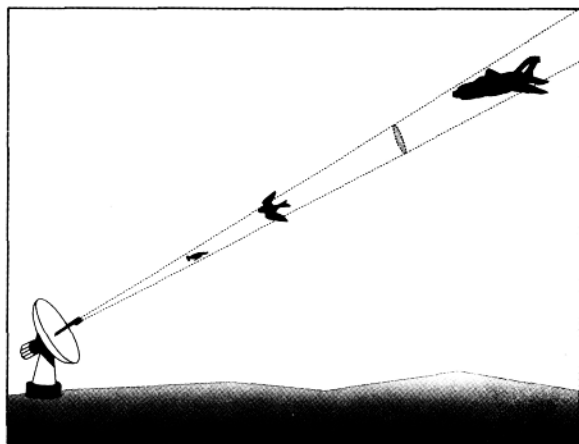


图 1.2 朝向昆虫、小鸟和飞机的雷达脉冲

有些雷达以上下扫描的方式工作,同时方位角缓慢转动。这些能测高度的雷达可以提供各种各样的风暴图像,对那些主要是进行水平扫描的常规雷达来讲,是一个有益的补充。

最终,接收机一旦探测到回波信号并将其放大,目标回波就会在显示设备上显示出来,人们就可以看见并了解雷达所探测的目标。绝大多数气象雷达是在一个有地图背景的显示器上显示其数据,此显示器还能显示诸如国家和地区的边界、城市位置和其它一些重要特征。雷达数据通常采用彩色编码,所以,我们能判定出哪些风暴是强烈的和危险的,哪些风暴较弱些,不足为虑。

1.3 雷达的类型

基于以上背景知识,现在让我们来研究当今现有的几种类型的雷达。

几乎所有能被分类的事物均可再进行分类。对于我们不太熟悉的一个事物,我们只知道其最基本的成员类型。例如,当我们想到长颈鹿或斑马及其它动物时,我们以为每样动物只有一种。事实上,长颈鹿有三种,斑马有两种。因此谈到雷达,也有很多种,主要包括:单基与双基雷达,连续波(CW)与脉冲雷达,多普勒雷达,调频—连续波(FM-CW)雷达,风廓线雷达,进场着陆控制与飞机监视雷达,机载雷达,船载雷达,气象雷达,双波长雷达,极化分集(polarization-diversity)雷达,等等。每种雷达都是为着某一特殊的用途而设计的,通常都能很好地完成其特定的任务。换句话说,每一种雷达可能根本不能用于其它的目的。让我们仔细研究其中一些雷达,看看它们是怎样工作的,与其它类型的雷达有何不同。

一、单基与双基雷达

在我们考察气象雷达时,我们通常会想到所谓的单基脉冲雷达。术语“单基”与“双基”,和雷达的接收天线及其发射天线的位