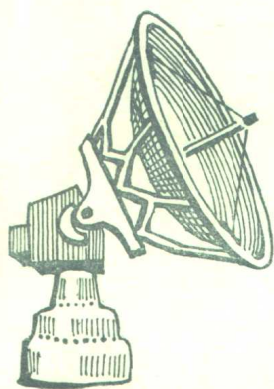


现代气象雷达

XIANDAI QIXIANG LEIDA

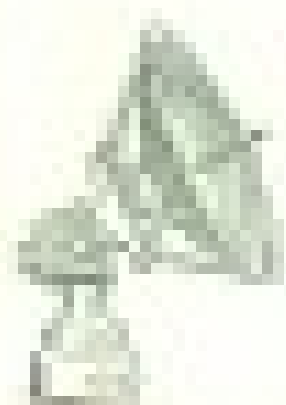


蒋培杰著

气象出版社

现代气象雷达

王秉刚 王秉刚 王秉刚



气象出版社

气象出版社

现代气象雷达

蒋培杰 编著

气象出版社

内 容 提 要

本书是一本专门介绍现代气象雷达的专业科普性书籍。书中介绍了常规气象雷达，特种气象雷达和信号数字处理等知识。全书避免了过多的数学分析，把重点放在物理概念的叙述上，并介绍了许多气象雷达的典型电路。

本书可作为具有中等文化程度以上的干部、科技人员、气象雷达站的工作人员和雷达制造工厂的工程技术人员参考书，也可以作为大专院校有关专业师生的教学参考书。

现代气象雷达

蒋培杰 编著

责任编辑 陶国庆

* * *

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京市昌平科技印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经售

* * *

开本：850×1168 1/32 印张：11.5 字数：292千字

1987年12月第一版 1987年12月第一次印刷

印数：1—2000 定价：2.30元

ISBN 7-5029-0013-6/TN·0002

前 言

随着气象雷达的迅速发展与广泛应用，常规气象雷达往往不能满足许多特殊研究工作的要求。于是，许多为完成某些特殊探测任务的新型气象雷达相继而出，并在蓬蓬勃勃地向前发展。为了适应我国气象雷达的发展，编著了这本“现代气象雷达”。书中在叙述常规气象雷达的基础之上，以较大的篇幅介绍了各种用途的特种气象雷达。借取国外的经验，促使我国气象雷达的更快发展，是本书的目的。

本书是笔者根据十几年以来的教学实践和在气象雷达制造工厂从事设计和生产的实践以及在使用和修复雷达的实践中积累的资料编著而成。这是一本专门介绍现代气象雷达的专业科普性读物。书中第一章介绍了气象雷达探测大气的基本原理；第二章到第五章介绍了常规气象雷达；第六章到第八章介绍了特种气象雷达和新技术的应用；第九章介绍了信号的数字处理；第十章介绍了测风雷达。选材上力求现代性，写法上力求科普性，这是本书的特点。对于一般的读者来说，均可掌握书中的大部分知识。

在成稿的整个过程中，从全书的结构到写作技巧等方面，多次得到华东工程学院朱逸农教授的热情指导与帮助。在完稿以后，朱逸农教授又详细地审阅了全部书稿，并提出许多具体意见。在此表示深刻的谢意。在成稿过程中，曾得到华东工程学院四系何国栋副教授，南京大学物理系张善杰副教授，许培英讲师，沈振宇讲师等人的帮助，在此表示感谢。南京大学气象系石宗祥同志担任了全书的制图工作，也顺致谢意。

由于笔者才学疏浅，文笔简陋，书中的错误和不当之处，请读者指正。

蒋培杰

1983. 8.

目 录

第一章 概论	1
§1 序论	1
§2 雷达基础	7
§3 雷达目标	12
§4 气象雷达方程	17
§5 雷达回波中的信息	21
§6 气象雷达的工作波长	29
§7 雷达参数的选择	35
第二章 发射系统	43
§1 概述	43
§2 脉冲调制器	47
§3 磁控管振荡器	54
第三章 接收系统	62
§1 概述	62
§2 接收机噪声和灵敏度	66
§3 高频放大器	70
§4 本振和自动频率控制电路	76
§5 动态范围和自动增益控制电路	80
§6 距离订正和中频衰减电路	85
第四章 显示器	91
§1 示波管	91
§2 距离显示器	99
§3 平面位置显示器	103
§4 距离高度显示器	108
§5 视频积分与分层显示器	112
§6 字符显示器	117

第五章 视频积分与分层显示器	126
§1 时钟脉冲电路.....	126
§2 计数器与译码器.....	129
§3 视频放大与积分电路.....	135
§4 量化器与分层电路.....	139
§5 附属电路.....	143
第六章 多普勒气象雷达	146
§1 脉冲雷达的工作限度.....	146
§2 多普勒效应.....	151
§3 连续波雷达.....	156
§4 调频连续波雷达.....	159
§5 脉冲调幅波的多普勒效应.....	166
§6 脉冲多普勒雷达.....	171
§7 脉冲多普勒雷达的几种解模糊方法.....	184
第七章 特种气象雷达	191
§1 概述.....	191
§2 甚高频 (VHF) 气象雷达.....	193
§3 圆极化波雷达.....	201
§4 声波气象雷达.....	210
§5 光雷达.....	218
§6 超视距雷达系统.....	225
§7 毫米波气象雷达.....	234
第八章 新技术在气象雷达中的应用	246
§1 脉冲压缩雷达.....	246
§2 合成孔径雷达.....	253
§3 频率捷变雷达.....	259
§4 动目标显示天气雷达.....	265
§5 噪声天气雷达.....	273
第九章 信号的数字处理	281
§1 概述.....	281
§2 傅氏级数与傅氏变换.....	286

§3 采样与保持电路.....	290
§4 快速傅氏变换 (FFT)	296
§5 快速傅氏变换的硬件实现.....	309
§6 信号的相关处理.....	314
§7 多普勒信号的实时处理.....	321
第十章 测风雷达	328
§1 二次雷达原理.....	328
§2 雷达测量风速.....	333
§3 相干声多普勒测风雷达.....	344
§4 光雷达测风.....	352
结束语	354
参考文献	357

第一章 概 论

§1 序 论

雷达这个名词，是由英文“Radar”音译而来的。英文“Radar”这个字是由词组“Radio detection and Ranging”编写而成的。词组的含意是“无线电探测和测距”，也就是用无线电的方法发现并测定空间目标的位置。

从工作原理的角度上说，雷达的出现应当追溯到20年代。在当时，曾用中频（MF）和高频（HF）无线电信号（频率从1—30MHz）垂直地发射到电离层，并用接收机接收来自电离层的回波信号，以达到探测电离层的目的。到了30年代，尤其是在第二次世界大战期间，由于军事上的目的，才出现今天所说的雷达设备。但是，当时的雷达结构比较简单，工作频率也比较低，所能探测到的信息量也是很少的，只是满足于空间目标的定位。自从雷达出现以后，它的发展很快，工作频率也不断地提高。随着微波电子管（如多腔磁控管、速调管等）和微波器件的诞生与发展，使雷达的工作频率很快地发展到微波波段，这就是今天所说的微波雷达。

在第二次世界大战结束以后，雷达的应用越来越广泛，并从军用发展到民用。气象雷达的应用和发展就是一个很好的例子。在第二次世界大战期间，美国曾用波长为10cm的SCR-584型火控雷达跟踪气球上的反射靶，以探测高空的风向和风速。这是最早的把军用雷达用于气象观测的例子，这也是最早的气象雷达。

在第二次世界大战以后的30多年里，雷达技术有了飞跃的发

展，并研制了许多不同用途的雷达系统。同时，雷达的应用范围也越加广泛。例如：军用雷达主要有警戒雷达、炮瞄雷达、制导雷达、自导雷达、空载截击雷达和机尾保护雷达等等；民用雷达主要有导航雷达、气象雷达、天文雷达和交通管制雷达等等。雷达的工作频段也开拓得更加广泛，如图 1.1.1 所示。雷达的工作方式也越来越多，例如有脉冲雷达、连续波雷达、多普勒雷达、光雷达和声雷达等等。雷达探测的信息量也越来越多。从目标定位开始，发展到探测目标的形状、性质、运动的方向和速度、回波强度、大气湍流和流场结构等等。因此，可以毫不夸张地说，在今天的科学技术迅速发展的道路上，雷达已经成为一个成熟的而又十分重要的探测工具了。

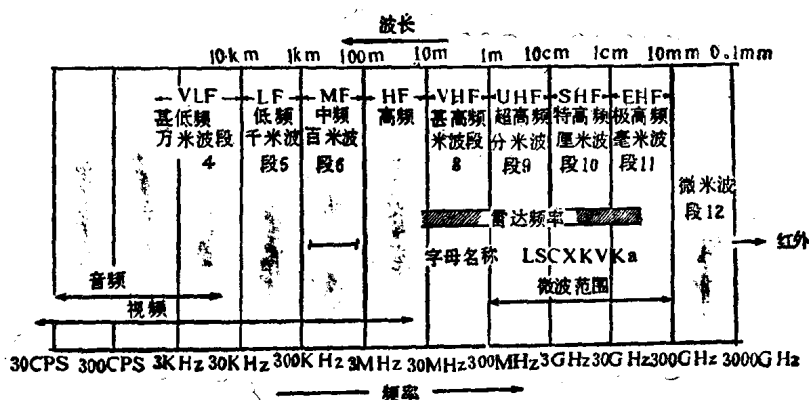


图1.1.1 雷达的工作频段

自60年代以来，由于半导体技术和数字技术的飞速发展，雷达技术领域中的数字化和自动化的发展也十分迅速。不同类型的电子数字计算机，已成功地应用到相应的雷达上，作为雷达设备的自动控制和终端处理系统，并显示了很大的优越性。正因如此，在今天的雷达概念里，人们的理解已远远地不同于原始的雷达概念了，已把雷达技术和电子数字计算机结合成一个不可分割

的整体。

气象雷达始终是雷达领域中的一个重要的分支。在目前的气象雷达中，不但有测风雷达、测雨雷达，还有为完成某些特殊观测任务的特种气象雷达。利用这些雷达，不但可以测出降水区域的分布、雨强、雨量和冰雹，还可以测出气象目标的运动参数，台风、龙卷风及其内部的流场结构等。有一些雷达还可以测出晴空湍流、边界层大气的性质和大气的温度廓线等。由此可以看出：在气象科学领域中，气象雷达的应用不但广泛，而且它能为人们提供更多的气象信息，不断地推动着气象科学的迅速发展。

关于国内和国外气象雷达的发展状况，简单地介绍如下：

1. 我国气象雷达发展的概况

在60年代以前，我国的气象雷达是很少的。当时所用的雷达，都是从国外进口的。例如：有英国的Decca系列和日本的MR系列。从60年代开始，我国才着手于气象雷达的研制和生产。例如711型3cm的测雨雷达等。到现在为止，711型测雨雷达已在全国建站200多个。从70年代初期开始，我国又研制了具有视频积分装置的5cm的测雨雷达，即713型测雨雷达。目前，已用713型雷达建站20多个。从80年代初期开始，我国又研制了具有数字处理系统的10cm测台风雷达，即714型测台风雷达。到目前为止，在我国各频段上的常规气象雷达的研制工作都已完成。除了以上的常规气象雷达以外，早在60年代，我国还研制了3cm的测高雷达（也可用于测雨），即712型气象雷达。从1975年起，在711型气象雷达的基础上，还研制了具有视频积分装置的半导体雷达，即715型测雨雷达。因这种雷达的基本性能和711型雷达相似，至今尚未投入生产。我国研制的测风雷达有701型测风雷达，以后又研制了具有数码指示装置的测风雷达702型和具有计算机系统的704型测风雷达。

关于特种气象雷达的研制和应用，例如多普勒气象雷达等，我国已开始考虑。可以预计，在不久的将来，我国自行研制的特

种气象雷达，一定会相继涌现出来。

2. 国外气象雷达发展的概况

(1) 美国

美国的气象雷达多数是由军用的炮瞄雷达和民用的导航雷达改装而成的，只有少数骨干雷达才是专门设计的。因此，美国目前使用的气象雷达有不少还是50年代的老产品。从70年代中期开始，虽然逐步地更新了一部分老式的产品，但到目前为止，还未全部更新。

美国国家气象局的气象雷达网由WSR-57型和WSR-74C型测雨雷达组成，其中大部分是WSR-57型。可以看出，WSR-57型测雨雷达是美国的骨干气象雷达，这种雷达是在50年代的末期设计定型、60年代用于建网的10cm测雨雷达。该雷达天线的直径为3.66m，天线外面有一个直径为5m的天线罩。到目前为止，这种雷达已应用了20多年。在这20多年中，陆续地给雷达增设了一些现代化的附属设备，例如视频积分处理器，回波图象的远距离传输等。WSR-74C型雷达是从70年代开始补充的测雨雷达，它的性能和WSR-57雷达相似，只是用集成电路代替了原来的电子管线路，性能提高不大。虽然为它配备了小型计算机作为回波信号的数字处理设备，但因造价太高而未大量应用。D/RADEX是美国国家气象局研制的一套以计算机为基础的数字处理系统，可以和WSR-57雷达接口，从而增强了这种雷达的生命力。从80年代开始，美国陆续使用了具有实时处理的多普勒气象雷达，装备在现有的雷达网内，以代替过去使用的WSR-57型测雨雷达。

(2) 日本

日本的气象雷达是专门设计的，并且从1954年起开始建立气象雷达网。在日本，气象雷达的主要任务是测台风，其次是测雨。1964年，在富士山的顶峰建立了气象雷达网的中心雷达站。它用一部10cm的气象雷达，探测距离可达800km，到目前为止，是世界上最大的雷达站。在中心站的控制室内除了有常规的距离

显示器 (A/R), 平面位置显示器 (PPI) 和距离高度显示器 (RHI) 外, 还有等高平面位置显示器 (CAPPI) 和专供自动照相和录相用的显示器。雷达的回波图象和信息数据通过微波中继站传送到100km以外的东京气象厅。可以看出: 富士山气象雷达中心站是一座现代化的雷达站。

在70年代的末期, 日本对富士山的气象雷达进行了改装, 使它具有多普勒探测能力, 进一步完善了雷达系统。

(3) 英国

英国的气象雷达多数是Plessey系列、Decca系列和Cossor系列。Plessey系列中的Plessey-435气象雷达和美国WSR-57雷达相似, 并且也把它改装成了具有多普勒探测能力的气象雷达。

3. 气象雷达的新发展

从气象雷达的发展过程可以看出: 气象雷达的发展是随着军用雷达和电子技术的发展而发展起来的。因此, 凡是军用雷达中的新技术, 都可以适当地应用于气象雷达。从目前的情况看, 气象雷达的发展趋势, 一是提高雷达自身的探测能力, 二是改进回波信号的提取方法和数字处理的能力。

(1) 两维和多维脉冲多普勒雷达系统

脉冲多普勒雷达可测出目标的径向速度分量, 但是, 水平风速是二维矢量, 而且空气运动的垂直分量也需要了解和掌握。因此, 为了获得两维和多维的风场矢量, 必须用多部脉冲多普勒雷达同时进行观测, 所以建立脉冲多普勒雷达网是十分必要的。这项工作中存在的问题, 一是要各雷达站之间的工作协调一致, 二是两部或多部雷达提供的数据需用复杂的计算机处理。目前正在研究一种所谓“同平面”扫描技术和FFJ技术来解决这两个问题。

(2) 下一代气象雷达NEXRAD

现在美国正在研制下一代气象雷达, 暂定名为NEXRAD雷达。这种气象雷达能探测到暴风雨中的雨滴和冰晶微粒的速度,

并能在彩色编码的电视屏上显示出预兆龙卷风即将来临的运动模式，还能更好地识别强烈雷暴与非强烈雷暴，并有助于探测阵风锋面和风的切变，同时又可以监视飓风和冬季风暴。

NEXRAD雷达将于1985年首批投入使用，并计划到1988年开始大量应用这种新型的脉冲多普勒气象雷达，在美国的雷达网中补充150部。

(3) 多普勒气象雷达联合业务工作计划 (JDOP)

由于多普勒雷达的造价要比普通的气象雷达高得多，要在全美国范围内普遍使用它，还要进一步研究。为此，美国国家气象局，空军气象局、联邦航空管理局和国家强风暴实验室，空军地球物理实验室等五个单位进行了多普勒气象雷达联合业务工作计划的试验，即JDOP计划。

该计划在1977年初开始，到80年代初期结束。计划的目的是通过试验确定多普勒气象雷达的效能，并对气象雷达参数，指标作进一步地研究，进一步完善多普勒气象雷达的数据处理系统和传输系统，从而发展一套适宜于网站工作的多普勒气象雷达系统，代替已使用了20多年的WSR-57常规气象雷达。

(4) 普通气象雷达的数据集合

普通的气象雷达为了取得各种数据，在设计时必须考虑到，既有高的分辨能力，又有兼顾到气象雷达必须获得的五个参数。

理想的气象雷达工作波长为10cm，脉冲宽度为1 μ s，波束宽度为1°，仰角扫描范围为20°，方位扫描范围为360°。象这样一部雷达，要得到30个独立单元所需的积累时间，即得到一次完整扫描所需的时间约为30分钟以上。很显然，获得数据所需的时间太长。为了缩短这个时间，就必须牺牲一个或几个参数的分辨能力。因此，目前正在研究和利用以下几种新的方法：

①使用更短的工作波长，如5cm波长，可进一步缩短扫描时间，但这会引起严重的衰减；

②使用频率捷变技术，在通常的情况下，可使扫描时间缩短

$\frac{1}{10}$;

③使用脉冲压缩技术，可提高雷达的距离分辨力（类似于单脉冲雷达）；

④使用噪声雷达技术，可以提高对远程目标和近程小目标的检测能力；

⑤使用电扫描技术，可使天线波束迅速地从—个方向扫描到另—个方向，目前已有仰角电扫描，方位角机械扫描的气象雷达。

（5）气象数据的处理技术

目前，多数气象雷达都配有小型计算机，如美国企业电子公司研制的WSR-74系列的C波段气象雷达，采用了“数据通用Nova3/D”型小型计算机。计算机将提取出来的数据绘制成降雨量位置三维图。

（6）研制高功率S波段（11cm）气象雷达

英国皇家雷达和信号研究院，研制成了一种新型的S波段（11cm）高功率气象雷达，它可在各种恶劣天气条件下探测目标，同时测出风速。

§2 雷达基础

雷达的基本概念是比较简单的。雷达的工作原理上很容易为人们所理解。雷达是以向空间发射电磁波，并检测来自目标的回波的方法去判断目标是否存在，以及目标的空间位置。因此，雷达是一种有源设备（它用自身辐射的电磁波探测目标）。

可以用一个极其普通的例子来说明雷达的工作原理。手电筒是人们常用的夜间照明工具，但是，它的工作原理是人们认为既简单而又不去多想的问题。手电筒可以发射出一束光波并在大气中传播。在大气中光波传播的路径是直线，速度称为光速（用 $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 表示）。在光波传播的过程中，如果遇到了物体，

便产生反射波。反射波也是光波。所以反射波按照同样的速度但和发射波相反的方向传播。当反射波被人们的眼睛接收以后再传向大脑，便产生感觉，即看到了物体。可以看出：手电筒的工作原理是和雷达的工作原理相似的。

应当指出：只能从工作原理上讲，手电筒和雷达是相似的。在其他方面，两者之间有着简直无法相比的巨大差别，这种差别主要表现在结构上和探测能力上。相比之下，雷达的结构远远地比手电筒复杂。在探测能力上，雷达可以对远距离目标（一般为几百公里）进行探测，并能精确地定位。对此，手电筒是无能为力的。

雷达的工作频段，如图1.1.1所示。实际上，雷达工作的主要频段是微波波段。尤其是气象雷达更是如此。雷达所辐射的电磁波的形式，取决于被探测的目标的性质和所希望获得的目标信息。例如：常规气象雷达均采用脉冲方式工作。也就是说，雷达发射的电磁波是脉冲式的。这种雷达系统便称为脉冲雷达。为了保证脉冲雷达的测距精度，发射脉冲的宽度（也叫脉冲的持续时间）要求很窄，一般只有1—2微秒（用 μs 表示，1秒= 10^6 微秒）。为了保证远距离目标的探测，发射脉冲的重复频率很低，一般只有几百赫（Hz），也就是说，每秒钟只发射几百个脉冲。有时需要探测目标的运动信息，可用雷达发射频率受调制的连续（有时也用脉冲波）波信号，这便是调频连续波雷达系统。无论发射什么形式的电磁波，都要求它能包含有足够的能量（用发射功率表示），以便探测最大距离上的最小目标。此外，雷达还必须配有良好的接收机和显示目标信息的系统。

脉冲雷达的工作原理如图1.2.1所示。从图中可以看出，脉冲雷达是由发射系统、接收系统、显示系统和天线系统四个部分组成。

发射系统的作用是产生一定形式的大功率高频振荡信号。雷达发射的电磁波的形式，是由发射系统确定的。发射系统输出的

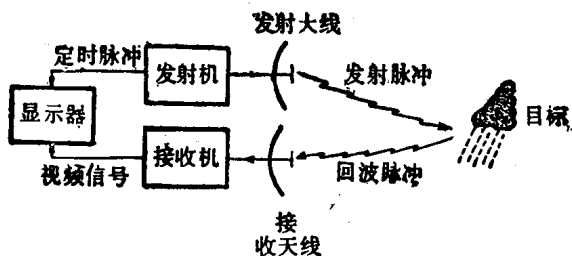


图1.2.1 脉冲雷达的原理图

大功率高频振荡信号通过馈线送往发射天线。发射天线的作用是把大功率高频电信号转换成为大功率高频电磁波信号，并向预定的方向辐射出去。

发射天线辐射出去的电磁波，以直线的路径和以光波的速度在大气中传播。在传播的路径上，如果遇到了目标物（云、雨等），便对照射的电磁波产生散射和吸收。需要说明，我们现在的目的不是去研究目标对电磁波的吸收作用如何，而要叙述目标对电磁波的散射作用及后果。目标散射的能量也是一种电磁波，它分布在目标周围的各个方向上。在这些散射波中，我们感兴趣的仅仅是处在雷达接收机方向上的散射波。为了和其他方向上的散射波相区别，把在雷达接收机方向上的散射波称为后向散射波，也常常称它为目标的后波。目标的后波以光波的速度沿着和发射波相反的方向传播到雷达的接收天线，并送到接收机。

由上述可知：从功率的角度上讲，回波信号仅仅是散射能量中的很小的一部分，它比发射信号的能量小得多。对于如此微弱的回波信号，人们无法直接地去认识其中的信息，必须经过接收机中各级放大器和信号变换电路以后，把它放大到100万倍以上，才可以为人们识别。因此，雷达接收机的任务是对回波信号进行放大和变换，以满足雷达显示器正常工作时的要求。

显示器是常规气象雷达中最基本的终端设备。它可以显示出