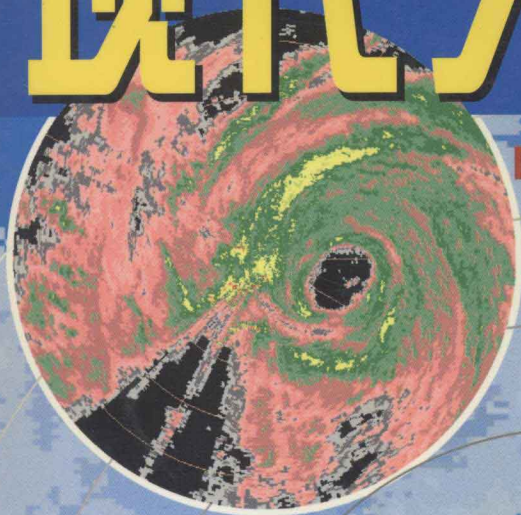


主编 何建新

现代天气雷达

MODERN WEATHER RADAR



电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书以新一代天气雷达系统为轮廓,首先介绍了雷达系统的基本组成,详细描述了各个分机的组成及性能特点。其次介绍现代天气雷达信号处理的原理和天气雷达中的新技术。最后对新一代天气雷达系统的组成和应用作了必要阐述。

本书可作为从事现代天气雷达系统技术人员参考用书,也可作为高年级本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代天气雷达 / 何建新主编. —成都: 电子科技大学出版社, 2004 4

ISBN 7-81094-441-X

I. 现... II. 何... III. 气象雷达 IV. TN959.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 021918 号

现代天气雷达

何建新 主编

出 版: 电子科技大学出版社(成都建设北路二段四号 邮编: 610054)

责任编辑: 罗 雅

发 行: 新华书店经销

印 刷: 成都市墨池教育印刷总厂

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张 22.625 字数 551 千字

版 次: 2004 年 4 月第一版

印 次: 2004 年 4 月第一次印刷

书 号: ISBN 7-81094-441-X/TN·7

定 价: 38.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

◆ 邮购本书请与本社发行科联系。电话:(028) 83201495 邮编: 610054

◆ 本书如有缺页、破损、装订错误,请寄回印刷厂调换。

前 言

多普勒天气雷达已成为对灾害性天气监测、预测的重要手段之一，世界上一些发达国家已普遍使用这一技术。我国从 1998 年开始由国务院正式批准利用国债资金在全国建立新一代多普勒天气雷达监测网；初步确定在全国布设 126 部雷达，以进一步加强对灾害性天气的监测和预测水平。迄今为止，已有近 50 部雷达相继建成，并在实际业务中发挥效益。

新一代多普勒天气雷达能够定量探测降雨回波强度、径向移速、速度谱宽等信息。其探测对象包括降水、热带气旋、雷暴、中尺度气旋、湍流、龙卷、冰雹、冻雨、冻结层、融化层等，并具有一定的晴空回波探测能力。是目前其他大气探测手段无法取代的重要探测系统。

我国的业务用天气雷达建设是从 20 世纪 60 年代开始的。起初，由于关键技术没过关，先后从英国引进了几部 3 cm 雷达在我国沿海和个别重要城市使用，如马可尼-51 型，坦卡-41 型等。1964 年开始又从我国部队引入军用 843 型 10 cm 雷达用于对台风的监测，取得初步成功，后又由厂家进行了改装，并在业务中得到正式使用。70 年代到 80 年代，性能更优越的 711、713、714 等型天气雷达逐渐成为气象观测业务的主力。90 年代以后，初步具有多普勒功能的天气雷达也在我国研制成功，并在业务中试用。

由于雷达在短式预报和强对流天气预报中的卓越作用，越来越多的气象部门要求使用新一代多普勒天气雷达 (CINRAD) 或与 CINRAD 功能与性能相近的雷达。近几年来，也有一些关于新一代天气雷达的著作、论文或教科书面世，如张培昌教授的《雷达气象学》、《大气微波遥感基础》，刘志澄、李柏合著的《新一代天气雷达系统环境及运行管理》等，80 年代出版的还有蒋培杰的《现代气象雷达》，李建辉的《气象卫星雷达数字化图像的分析应用》等。这些著作的一个重要特点是对雷达气象学、大气及云雨辐射论述较多，对雷达系统的组成原理、气象目标的多普勒信号处理原理涉及不多，特别是对现代天气雷达的进展缺乏系统性总结。鉴于此，作者萌发了一个想法，编写一本侧重从工程角度出发描述现代天气雷达及进展的著作，在本院领导尤其是院长段廷扬教授及同事们的鼓励与支持下，我们以有限的时间完成了编写，以惶恐之心将书稿交付印刷。本书的顺利出版还得益于本院副院长杨家仕教授和研究生处李燕凌处长的大力支持。

本书以新一代天气雷达系统为轮廓，首先介绍了雷达系统的基本组成(以第 2 章为主)，而没有过多强调天气雷达，因为天气雷达系统与其他雷达系统在原理上的差别实在太小，在描述该部分时，较多地参考了参考文献中列出的一些书籍。其次是介绍现代天气雷达信号处理的原理和天气雷达中的新技术(以第 3、4、5、9 章为主)，是本书的重点之一。最后对新一代天气雷达系统的组成和应用作了必要阐述。

全书共 9 章，第 4 章、第 7 章和第 2.3 节、第 2.4 节由姚振东教授编写，第 6 章由郭在华编写，第 8 章由王中科编写，第 1 章及第 9.11 节由李飞编写，其余部分由何建新编写。全书由何建新统编。不可否认，由于编写水平的限制，作者的愿望很难通过该书得以完全表达。我们真诚地欢迎，并期待读者能对书中的错误、失误给予指正。

作 者

2004 年 1 月

本书出版得到以下项目的资助

四川省杰出青年学科带头人培养基金

成都信息工程学院研究生教育建设项目

北京敏视达雷达有限公司 CINRAD 信号处理系统研究项目

目 录

第 1 章 雷达概论	1
1.1 雷达的技术发展	1
1.2 脉冲雷达框图	3
1.2.1 发射机	3
1.2.2 收发开关	4
1.2.3 天线	4
1.2.4 接收机	4
1.2.5 信号处理	5
1.2.6 数据处理	5
1.2.7 显示器	6
1.2.8 雷达控制	6
1.2.9 波形	6
1.3 雷达的应用和分类	6
1.3.1 军用雷达	7
1.3.2 民用雷达	8
1.3.3 雷达的分类	9
1.4 雷达频率	9
第 2 章 雷达系统	11
2.1 雷达发射机	11
2.1.1 雷达发射机的任务和基本组成	11
2.1.2 雷达发射信号及其参数	12
2.1.3 雷达发射机的主要质量指标	14
2.1.4 单级振荡式发射机	18
2.1.5 主振放大式发射机	22
2.1.6 固态发射机	27
2.1.7 脉冲调制器	33
2.2 雷达接收机	38
2.2.1 雷达接收机的组成和主要质量指标	38
2.2.2 接收机的噪声系数和灵敏度	41
2.2.3 雷达接收机的高频部分	50
2.2.4 本机振荡器和自动频率控制	56
2.2.5 接收机的动态范围和增益控制	59
2.2.6 滤波和接收机带宽	62

2.3	雷达天线	66
2.3.1	天线参数	66
2.3.2	天线辐射方向图	70
2.3.3	抛物面反射器天线	74
2.3.4	波导及馈线	78
2.3.5	雷达天线罩	85
2.3.6	天线的稳定	86
2.4	天线伺服系统	87
2.4.1	雷达伺服系统的组成	87
2.4.2	轴角编码	90
2.4.3	连续伺服系统	97
2.4.4	数字伺服系统	98
第3章	天气雷达系统设计	105
3.1	引言	105
3.2	电磁波及其在大气中的传播	105
3.2.1	散射现象及散射特性	106
3.2.2	后向散射截面	106
3.2.3	单个小球形粒子的散射——瑞利散射	107
3.2.4	单个球形粒子的散射——米散射 (Mie 散射)	107
3.2.5	粒子群的散射	108
3.3	球形水滴和冰粒的散射	109
3.3.1	单个球形粒子的雷达截面和后向散射截面	109
3.3.2	雷达反射率与反射率因子	110
3.3.3	瑞利后向散射与米后向散射的比较和等效反射率因子	112
3.3.4	球形干冰粒对雷达波的散射	113
3.4	晴空回波的散射和反射机制	114
3.4.1	湍流大气对雷达波的散射	115
3.4.2	分层大气对雷达波的镜式反射	115
3.5	气象目标的雷达方程	115
3.6	设计所要考虑的因素	117
3.6.1	衰减的影响	118
3.6.2	距离——速度模糊	124
3.6.3	地杂波的影响	124
3.6.4	电磁波在大气中的折射	124
3.6.5	电磁波的反射	127
3.7	天气多普勒雷达系统参数的选择	127
3.7.1	雷达工作频率的选择	128
3.7.2	雷达频率的稳定性能	128

3.7.3 天线波束宽度	129
3.8 信号处理精度及处理器实现考虑	130
3.8.1 多普勒雷达信号处理的简单描述	130
3.8.2 测量精度	132
3.9 应用考虑	133
3.9.1 降雨测量	133
3.9.2 强暴风雪报警	134
3.9.3 微爆现象	134
3.10 多普勒天气雷达数字化大动态接收机	135
3.10.1 系统基本组成	135
3.10.2 数字锁相频率合成器	136
3.10.2 系统特性标定	136
3.11 WSR-98D 天气雷达发射机设计总结	137
3.11.1 工作原理描述	138
3.11.2 发射机达到的性能指标	138
3.11.3 雷达发射机采用的新技术	138
第 4 章 常规天气雷达探测的基本理论	141
4.1 常规天气雷达的组成及工作原理	141
4.2 气象目标对电磁波的散射	143
4.2.1 发射接收信号与目标探测	143
4.2.2 雷达电磁脉冲的散射	143
4.2.3 探测目标的能力与波长的关系	144
4.2.4 气象回波信号涨落现象	144
4.2.5 气象回波信号强度	146
4.3 气象雷达方程	148
4.4 数字化常规天气雷达	150
4.4.1 引言	150
4.4.2 天气雷达数字系统特点	150
4.4.3 天气雷达数字处理系统	156
4.4.4 天气雷达数字系统中数字化图像处理的基本内容	163
第 5 章 多普勒天气雷达回波信息处理原理	165
5.1 回波信号的解析形式	165
5.2 信号的取样和分析	165
5.2.1 信号的取样问题	165
5.2.2 平均速度和速度谱的计算	166
5.3 脉冲多普勒天气雷达回波的频谱分析	167
5.3.1 运动目标的多普勒效应	167

5.3.2	简单方脉冲序列的频谱	169
5.3.3	高频载波方脉冲序列的频谱	171
5.3.4	散射过程对载波脉冲的调制及回波信号的解调	174
5.4	雷达回波的脉冲对处理方法	177
5.5	信号处理的 FFT 方法及其他方法介绍	180
5.5.1	FFT 方法	181
5.5.2	VPC(Vector Phase Change)方法	182
5.6	几种信号处理方法的比较	183
5.7	影响多普勒回波谱宽的目标运动因素	185
5.7.1	风切变	185
5.7.2	波束宽度	186
5.7.3	下落速度分布	186
5.7.4	风湍流	188
5.8	信号处理	189
5.8.1	WSR-98D 速度探测方法	189
5.8.2	基本数据的产生	193
5.9	减轻数据模糊(Mitigation of Data Ambiguities)	194
5.9.1	距离折叠的解释	194
5.9.2	PRF 对 R_{\max} 和 V_{\max} 的影响	195
5.9.3	距离去折叠算法	195
5.10	速度退模糊算法	201
5.10.1	交错 PRT 方案及改进	201
5.10.2	空间连续性速度退模糊算法	203
5.10.3	不适当地退模糊的速度	205
5.11	地物杂波抑制及其算法	206
5.11.1	地物杂波污染	206
5.11.2	地物杂波抑制算法	207
5.11.3	地物杂波抑制区域的定义	209
5.11.4	地物杂波抑制算法的优点及局限性	210
5.11.5	间歇性点杂波抑制算法	210
第 6 章	多普勒气象雷达回波分析	212
6.1	概述	212
6.1.1	气象回波与非气象回波	212
6.1.2	脉冲多普勒天气雷达径向速度场分析基础	213
6.2	大范围降水多普勒速度图像的分析	214
6.2.1	风速随高度变化风向不变的多普勒速度图像	216
6.2.2	非均匀水平风场的多普勒速度图像	218
6.2.3	风向随高度的变化风速不变的多普勒速度图像	219

6.2.4	风向风速都随高度变化的多普勒速度图像	221
6.2.5	垂直剧变的风场多普勒速度图像	222
6.2.6	水平不连续风场多普勒速度图像	223
6.3	对流气团的多普勒速度图像	225
6.3.1	风速风向都不变的图像	225
6.3.2	气旋和反气旋的多普勒速度图像	226
6.3.3	辐合辐散多普勒速度图像	228
6.3.4	不同方向的对称流场多普勒速度图像的比较	230
6.3.5	龙卷涡旋特征(TVS)多普勒速度图像	235
6.3.6	同时存在两个辐散区的多普勒速度图像	238
6.3.7	环绕雷暴上升区的中层气流多普勒速度图像	239
6.3.8	超级单体风暴地面流场图像	240
第7章	中国新一代多普勒天气雷达(CINRAD)系统介绍	242
7.1	CINRAD SA	242
7.1.1	CINRAD SA 天气雷达简介	242
7.1.2	CINRAD SA 天气雷达系统工作原理	243
7.2	CINRAD SB 及 CINRAD CA	256
7.2.1	数字中频接收机原理模型	256
7.2.2	数字中频接收机框图	257
7.3	714CDN/SDN	258
7.3.1	CINRAD/CD 型全相参多普勒天气雷达系统	258
7.3.2	CINRAD/SD 型全相参多普勒天气雷达系统	259
7.3.3	714CDN 天线系统	259
7.3.4	714CDN 馈线系统	260
7.3.5	714CDN 发射系统	260
7.3.6	714CDN 接收系统	261
7.3.7	信号处理器	263
7.3.8	数据处理和终端显示系统	266
7.3.9	伺服单元	266
7.3.10	监控用 A/D 变换单元	267
7.3.11	电和电源	267
7.4	3830 型多普勒天气雷达	268
7.4.1	3830 技术特点及性能指标	268
7.4.2	3830 系统简述	269
第8章	多普勒雷达产品生成和应用	274
8.1	基本数据产品	274
8.1.1	平面位置显示(PPI)	274

8.1.2	距离高度显示 (RHI)	275
8.1.3	等高平面位置显示 (CAPPI)	275
8.1.4	垂直最大回波强度显示 (CR)	276
8.1.5	任意垂直剖面 (VCS)	276
8.2	物理量产品	277
8.2.1	回波顶高显示 (ETPPI)	277
8.2.2	垂直累积液态含水量显示 (VIL)	277
8.2.3	风切变产品系列	279
8.2.4	分层湍流组合 (CAT)	284
8.2.5	测量区域雨量	285
8.3	风场反演产品	287
8.3.1	VAD 技术测量风场结构原理简介	287
8.3.2	VAD 技术反演平均风向风速	292
8.3.3	垂直风廓线产品	294
第 9 章	新技术在气象雷达中的应用	296
9.1	脉冲压缩技术概述	297
9.2	线性调频脉冲压缩	300
9.2.1	线性调频脉冲压缩的基本原理	300
9.2.2	线性调频脉冲压缩的频谱特性	302
9.3	线性调频信号的模拟产生	305
9.3.1	有源产生法	305
9.3.2	无源产生法	306
9.4	模拟式压缩网络的实现	308
9.5	线性调频脉冲压缩信号的距离旁瓣抑制方法	309
9.6	线性调频脉冲信号产生及时域压缩处理的数字实现	311
9.7	线性调频脉冲压缩信号的频域数字处理	314
9.8	相位编码脉冲压缩	315
9.8.1	概述	315
9.8.2	二相编码信号	316
9.8.3	二相编码脉冲压缩雷达的旁瓣抑制方法	319
9.9	相位编码脉冲压缩信号的处理	320
9.10	脉冲压缩技术在气象雷达中的应用	321
9.10.1	必要性	322
9.10.2	编码波形设计	322
9.10.3	压缩滤波器设计	323
9.10.4	波形分析	324
9.10.5	数据分析	326
9.10.6	应用前景	328

9.11 偏振气象雷达现状及其应用	329
9.11.1 概述	329
9.11.2 圆偏振雷达技术	329
9.11.3 双线偏振雷达技术	330
9.11.4 椭圆偏振雷达技术	332
9.11.5 偏振雷达基本参数估算方法	332
9.11.6 选用参考	333
9.12 双(多)基地天气雷达技术及其应用	334
9.12.1 双(多)基地天气雷达系统构成及性能特点	334
9.12.2 双(多)基地天气雷达系统探测原理	336
9.12.3 双(多)基地天气雷达系统探测结果分析	339
9.12.4 应用前景	339
9.13 多参数雷达在气象观测中的应用	339
9.13.1 雷达参数的定义及其估计算法	341
9.13.2 NCAR-CP2 雷达在微雨中的竖向观测	343
9.13.3 对暴雨的雷达观测实验分析	344
参考文献	346

第1章 雷达概论

雷达最初是通过无线电技术对飞机探测和定位的(“radar”是 RAdio Detection And Ranging 的缩写)。但是随着雷达波束方向性和接收机灵敏度,以及发射机相参性的提高,雷达的作用越来越大,可以成功地测绘地球表面和天气图,并且雷达信号可以到达宇宙空间测到临近行星的表面特征。雷达波束就像 X 射线一样可以穿透雷暴雨和云体,观察其内部结构。后来的脉冲多普勒雷达技术在观察暴风雨结构上发挥了显著的作用,如实时显示龙卷风的发展过程。这样的观察所得的天气预报资料,为研究人员提供更好的预报和警告使之了解事物规律和暴风雨动力学。

雷达的基本概念相对简单,但在许多场合下它的实现并不容易。它以辐射电磁能量并检测反射体(目标)反射的回波的方式工作。回波信号的特性可以提供有关目标的信息。通过测量辐射能量传播到目标并返回的时间可得到目标的距离。目标的方位通过方向性天线(具有窄波束的天线)测量回波信号的到达角来确定。如果是动目标,雷达能推导出目标的轨迹或航迹,并能预测它未来的位置。动目标的多普勒效应使接收的回波信号产生频移,因而即使固定回波信号幅度比动目标回波信号幅度大多个数量级时,雷达也可根据频移将希望检测的动目标(如飞机、云、雨的移动)和不希望的固定目标(如地杂波和海杂波)区分开。当雷达具有足够高的分辨力时,它能识别目标尺寸和形状的某些特性。雷达可在距离上、角度上或这两方面都获得分辨力。距离分辨力要求雷达具有大的带宽,角度分辨力要求大的电尺寸雷达天线。在横向尺度上,雷达获得的分辨力通常不如其在距离上获得的分辨力高。但是当目标的各个部分与雷达间存在相对运动时,可运用多普勒频率固有的分辨力来分辨目标的横向尺寸。

雷达是一种有源装置,它有自己的发射机而不像大多数光学和红外传感器那样依赖于外界的辐射。在任何气象条件下,雷达都能探测或远或近的小目标,并精确测量它们的距离,这是雷达和其他传感器相比具有的主要优势。

雷达原理已在几兆赫兹(高频或电磁频谱的高频段)到远在光谱区外(激光雷达)的频率范围内得到应用。这范围内的频率比高达 $10^9:1$ 。在如此宽的频率范围内,为实现雷达功能而应用的具体技术差别巨大,但是基本原理是相同的。

最初,雷达是为了满足对空监视和武器控制的军事需求而研制的。军事应用使雷达技术的开发得到大量的财政支持。但是雷达同时也被用于许多重要的民用场合,如飞机、轮船、宇宙飞船的安全飞行;环境遥感,特别是气象遥感;法律的施行及许多其他应用。

1.1 雷达的技术发展

雷达作为人类各种先进技术结合的产物,经历了多次技术变革,下面介绍雷达技术发展的历史。

1886年~1888年,海因里奇·赫兹(Heinrich Hertz)验证了电磁波的产生、接收和散射。

1903年~1904年, 克里斯琴·赫尔斯迈耶 (Christian Hulsmeyer) 研制出原始的船用防撞雷达并获得专利权。

1922年, M. G. 马可尼 (M. G. Marconi) 在接受无线电工程师学会 (IRE) 荣誉奖章时的讲话中提出了一种船用防撞测角雷达的建议。

1925年, 约翰斯·霍普金斯大学 (Johns Hopkins University) 的 G. 布赖特 (G. Breit) 和 M. 图夫 (M. Tuve), 通过阴极射线管观测到了来自电离层的第一个短脉冲回波。

1934年, 海军研究实验室 (Naval Research Lab.) 的 R. M. 佩奇 (R. M. Page) 拍摄了第一张来自飞机的短脉冲回波照片。

1935年, 由英国人和德国人第一次验证了对飞机目标的短脉冲测距。

1937年, 由罗伯特·沃森·瓦特 (Robert Watson-Watt) 设计的第一部可使用的雷达“Chain Home”在英国建成。

1938年, 美国陆军通信兵的 SCR-268 成为首次实用的防空火控雷达, 后来生产了 3100 部。该雷达探测距离大于 100 海里, 工作频率为 200MHz。

1939年, 研制成第一部实用舰载雷达——XAF, 安装在美国海军纽约号 (New York) 战舰上, 对飞机的探测距离为 85 海里。

1941年12月, 那时已生产了 100 部 SCR-270/271 陆军通信兵预警雷达。其中一部雷达架设在檀香山, 它探测到了日本飞机对珍珠港的入侵。但是, 该反射回波信号被误认为是友军飞机, 铸成了大悲剧。

20 世纪 50 年代末以来, 由于航空与航天技术的飞速发展, 飞机、导弹、人造卫星及宇宙飞船等采用雷达作为探测和控制的手段, 尤其是在 60 年代中研制的反洲际弹道导弹系统, 对雷达提出了高精度、远距离、高分辨力及多目标测量等要求。由于解决了一系列的关键性问题。雷达进入蓬勃发展的新阶段。如脉冲压缩技术的采用; 单脉冲雷达和相控阵雷达成功研制; 在微波高功率放大管试制成功后, 研制成了主控振荡器—功率放大器型的高功率、高稳定度的雷达发射机, 并用于可控脉冲形状及相参雷达体系; 脉冲多普勒雷达体制的研制成功, 使雷达能测量目标的位置和相对运动速度, 并具有良好的抑制地物干扰等的的能力; 另外, 微波接收机高频系统中许多低噪声器件, 如低噪声行波管工量子放大器、参量放大器、隧道二极管放大器等的的应用, 使雷达接收机灵敏度大为提高, 增大了雷达作用距离; 由于雷达中数字电路的广泛应用以及计算机与雷达的配合使用和逐步合成一体, 使雷达的结构组成和设计发生根本性的变化。雷达采用这些重大技术后, 工作性能大为提高, 测角精度从 1 密位以上提高到 0.05 密位以下, 提高了一个数量级以上。雷达的作用距离提高到数千公里, 测距误差在 5 米左右; 单脉冲雷达跟踪带有信标机的飞行器, 作用距离可达数十万公里以上。雷达的工作波长, 从短波扩展至毫米波、红外线和紫外线领域。在这个时期, 微波全息雷达、毫米波雷达、激光雷达和超视距雷达相继出现。

20 世纪 70 年代以来, 雷达的性能日益提高而应用范围也持续拓宽, 举例如下:

(1) 由于 VHLSI 和 VLSI 的迅猛发展, 数字技术和计算机的应用更为广泛深入, x 信号处理技术得到了很大发展。

(2) 动目标检测 (MTD) 和脉冲多普勒 (PD) 等雷达的信号处理机更为精致、灵活, 性能明显提高。

(3) 自动检测和跟踪系统得到完善, 提高了工作的自动化程度。

(4)更多地采用复杂的大时宽带宽脉压信号,以满足距离分辨力和电子反对抗的需要。

(5)高可靠性的固态功率源更为成熟,可以组成普通固态发射机或分布于相控阵雷达的阵元上组成有源阵。

(6)许多场合可用平面阵列天线代替抛物面天线,阵列天线的基本优点是可以快速和灵活地实现波束扫描和波束形状变化,因而有很好的应用前景,例如:

- ①获得超低副瓣,用于机载雷达或抗干扰。
- ②组成自适应旁瓣相消系统以抗干扰。
- ③相控阵雷达连续出现,不仅用于战略而且也用于战术雷达,如制导、战场炮位侦察等。

1.2 脉冲雷达框图

脉冲雷达系统的基本组成如简化框图 1.2.1 所示(在其他资料中可见到雷达框图的其他实例)。发射机产生的雷达信号(通常是重复的窄脉冲串)由天线辐射到空间。收发开关使天线时分复用于发射和接收。反射物或目标截获并辐射一部分雷达信号,其中少量信号沿着雷达的方向返回。雷达天线收集回波信号,再经接收机加以放大。如果接收机输出的信号幅度足够大,就说明目标已被检测。雷达通常测定目标的方位和距离,但回波信号也包含目标特性的信息。显示器显示接收机的输出,操纵员根据显示器的显示判断目标存在与否,或者采用电子设备处理接收机的输出,以便自动判断目标的存在与否,并根据发现目标后的一段时间内的检测建立目标的航迹。使用自动检测和跟踪(ADT)设备时,通常向操纵员提供处理后的目标航迹,而不是原始雷达检测信号。在某些应用中,处理后的雷达输出信号可直接用于控制一个系统(如制导导弹),而无需操纵员的干预。

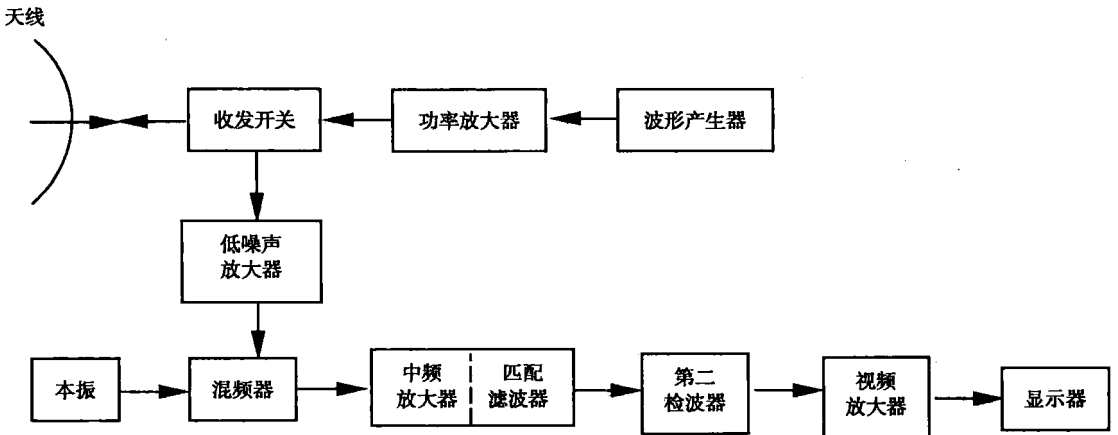


图 1.2.1 采用功率放大发射机和超外差接收机雷达的简化框图

下面对雷达的工作进行更详细的介绍,从发射机开始。

1.2.1 发射机

图 1.1 的发射机是一个功率放大器,例如速调管、行波管、正交场放大器或固态器件。

磁控管等构成的功率振荡器也能用做发射机，但与功率放大器相比，磁控管的平均功率有限。而功率放大器(特别是速调管)不仅可产生大的平均功率而且稳定度高(雷达性能的度量标准是平均功率，而不是峰值功率)。基本波形在送往功率放大器之前是在低功率电平上产生的，因而极易得到脉冲压缩和相参系统(如 MTI 雷达和脉冲多普勒雷达)所要求的特定波形。尽管磁控管振荡器也能用于脉冲压缩雷达和 MTI 雷达，但是采用功率放大器结构的雷达能获得更好的性能。当雷达对简易性和机动性要求较高，而并不需要大的平均功率、好的 MTI 性能或脉冲压缩时，雷达发射机也可采用磁控管振荡器。

典型的地面对空监视雷达发射的平均功率可以是几千瓦。近程雷达的平均功率可以是毫瓦数量级的。探测空间物体的雷达和高频(HP)超视距雷达的平均功率可达兆瓦数量级。

雷达方程说明雷达的探测距离与发射功率 4 次方根成正比。所以，为了将探测距离提高 1 倍，发射功率要提高 16 倍。这意味着，为提高雷达探测距离应使用的发射功率总量通常受到实际的和经济的条件限制。

发射机不仅要能产生大功率、高稳定的波形，而且常常还要在很宽的频率范围内高效、长时间无故障工作。

1.2.2 收发开关

它是用于保护接收机免受大功率发射机工作漏能损坏的快速转换开关。在接收时，发射机关闭，收发开关将接收到的弱信号送入接收机，而不是进入发射机。它通常是气体放电元件，并可与固态或气体放电接收机保护器共同使用。有时用固态环流器来进一步隔离发射机和接收机。

1.2.3 天线

发射机能量由方向性天线集聚成一个窄波束辐射到空中。在雷达中，机械控制抛物面反射面天线和平面相控阵天线都得到广泛的应用，电扫相控阵天线也有应用。大多数雷达天线所特有的定向窄波束不仅能将能量集中到目标上，而且能测量目标的方位。用于探测或跟踪飞机的雷达，天线波束宽度的典型值约为 1° 或 2° 。专用跟踪雷达一般有一副对称的天线，它辐射笔状波束的波瓣图。常用的探测目标距离和方位的地面对空警戒雷达，通常采用机械转动的反射面天线，它的扇形波束水平方向窄，垂直方向宽。对于绝大多数的雷达应用来说，雷达天线采用机械扫描是令人满意的。当波束必须快速扫描而用机械扫描又无法实现，并且可接受高成本时，雷达可使用电扫相控阵天线。电扫相控阵天线的波束控制可在微秒或更短的时间完成。

无论是地面雷达或车载雷达，天线尺寸都部分取决于雷达的工作频率和工作环境。由于机械和电气容差与波长成正比，频率越低，制造大尺寸的天线就越容易。在超高频波段(UHF)，一个大型天线(无论是反射面，还是相控阵天线)的尺寸可达 30 米或更大；在较高的微波频率[如 X 波段]，雷达天线的尺寸超过 3 米或 6 米就算是相当大的(曾经建造过比这更大的天线，但不常见)。尽管有波束宽度窄到 0.05° 的微波天线，但雷达天线波束宽度很少小于 0.2° ，这近似对应于 300 个波长的孔径。X 波段大约为 31ft，UHF 波段大约为 700ft。

1.2.4 接收机

天线收集的回波信号送往接收机。接收机几乎都是超外差式的。接收机的用途：(1)

将所需的回波信号从始终存在的噪声和其他干扰信号中分离出来；(2)放大信号，使其幅度足以在阴极射线管之类的显示器中显示或能被数字设备自动处理。在微波频段，接收机输出端的噪声通常源于接收机自身，而不是从天线进入的外部噪声。接收机的输入级不能引入过大的噪声，以免干扰信号的检测。在许多雷达应用中，第一级采用晶体管放大器时，它的低噪声是可接受的。接收机输入级的噪声系数的典型值为 1dB 或 2dB。许多民事应用要求有低噪声接收机前端(第一级)，但可达到的最小噪声系数对军用雷达来说并不总是最合适的。在高噪声环境下，无论是无意的干扰或敌方的人为干扰，采用低噪声接收机的雷达比采用高噪声接收机的雷达更容易受到影响。并且采用低噪声放大器前端将导致接收机的动态范围更小。这一点在某些情况下是不希望的，如当雷达面对敌方电子干扰或要利用多普勒效应探测强杂波下的小目标时。为了避免低噪声接收机的缺点，可不用高放级而只用混频器作为接收机的前端。混频器较大的噪声系数可通过等效地增加发射功率的方法来弥补。

超外差接收机混频器将射频信号转变为中频信号。中频放大器的增益使接收机信号电平增大。中频放大器还有匹配滤波器的功能：它使输出信噪比最大。中频输出信噪比最大使信号的可检测性最大。几乎所有雷达的接收机都近似为匹配滤波器。

接收机的第二检波器是包络检波器，它消除中频载波，并让调制包络通过。在 CW 雷达、MTI 雷达、PD 雷达中，由于使用了多普勒处理，相位检波器代替了包络检波器。相位检波器通过与一个频率为发射信号频率的参考信号比较，可提取目标的多普勒频率。接收机还必须包括用于消除固定杂波的滤波器和通过动目标多普勒频移信号的带通滤波器。

视频放大器将信号电平提高到便于显示它所含有信息的程度。只要视频带宽不小于中频带宽的一半，视频放大器对信号的可检测性就不会产生负面的影响。

在视频放大器的输出端建立一个用于检测判决的门限。若接收机的输出超过该门限则判定有目标。判决可由操纵员作出，也可无需操纵员的干预而由自动检测设备得出。

1.2.5 信号处理

雷达的信号处理由哪些部分构成，一直没有得到普遍的认同，但通常认为，信号处理是消除不需要的信号(如杂波)，并通过所需的目标信号。信号处理在作出检测判决的门限检测前完成。信号处理包括匹配滤波器、MTI 以及脉冲多普勒雷达的多普勒滤波器。脉冲压缩在检测判决前实现，尽管它并不符合上述的定义，但有时仍被认为是信号处理。

1.2.6 数据处理

检测判决之后的处理称为数据处理。自动跟踪是数据处理的主要实例。目标识别则是另一实例。最好在能滤除大部分无用信号的优良雷达中使用自动跟踪系统，这时跟踪系统只需处理目标数据而不涉及杂波。而当雷达不能消除所有的有害回波时，在跟踪系统的输入端必须有维持 CFAR 电路。

接收机的 CFAR 部分通常正好位于检测判决之前。当杂波和(或)噪声背景发生变化时，它能保持虚警率恒定。其目的是为了防止外部杂乱回波使自动跟踪系统过载。CFAR 电路从邻近目标的噪声或杂波中感知杂波回波的大小，并利用这一信息建立门限，从而使噪声或杂波的回波被门限滤除而不至于被自动跟踪系统误认为目标。

令人遗憾的是, CFAR 降低了检测概率, 并导致信噪比的损失和距离分辨力的降低。当自动跟踪计算机不能处理大量的回波信号时, CFAR 或其等效物是必要的, 但如果有可能应尽量避免采用 CFAR。若由操纵员来完成门限判决, 则在有限容量的自动跟踪系统中无需 CFAR, 因为操纵员通常能识别由杂波或增强了的噪声(如干扰)造成的回波, 而不致使它们与所需目标回波相混淆。

1.2.7 显示器

警戒雷达的显示器通常是 PPI(平面位置显示器)格式的阴极射线管。PPI 提供亮度调制、地图形式的图像。它用极坐标(距离和方位)来标识目标的位置。旧式雷达直接显示接收机的视频输出(称为原始视频), 但现代雷达一般只显示处理后的视频信号, 也就是自动检测装置或自动检测跟踪装置(ADT)处理后的视频信号。因为噪声和背景杂波已被消除, 所以有时称为廓清显示。

1.2.8 雷达控制

为了使雷达在不同环境条件下的性能达到最佳, 现代雷达能工作在不同的雷达参数下, 这些参数包括频率、发射波形、信号处理和极化方式。根据当地的天气、杂波环境(在距离和方位上都很少是均匀的)、是否受其他电子设备的干扰或干扰了其他电子设备等条件, 以及敌意 ECM(电子干扰)环境(军用雷达), 雷达参数要随之改变。在特定的条件下雷达性能要达到最佳, 上述的参数是不同的。这些参数可以按预期的环境预先编程送入, 或者由操纵员根据环境条件实时地选择。另一方面, 雷达控制能自动识别环境条件的变化, 并自动选择适当的雷达参数, 使雷达性能最优, 而这一切都不需操纵员的辅助。

1.2.9 波形

重复窄脉冲串是最常见的雷达波形。当脉冲串不能实现要求的特殊功能时, 雷达使用其他波形。在利用多普勒频移来测量目标的径向速度的专用雷达中, 使用连续正弦波。而当 CW 雷达要测距时, 采用频率调制连续波(FM-CW)。当要得到窄脉冲的分辨力和宽脉冲的能量时, 采用脉冲压缩波形。对低 PRFMTI 雷达和高 PRFPD 雷达而言, 为了消除距离和(或)多普勒模糊, 波形采用多个脉冲重复周期参差工作的脉冲串。

1.3 雷达的应用和分类

雷达已应用于地面、空中、海上和太空。地面雷达主要用来对飞机和太空目标进行探测、定位和跟踪; 船上雷达除探测空中和海面目标外, 还可用作导航工具; 机载雷达除要探测空中、地面或海面目标外, 还可用作大地测绘、地形回避及导航之用; 在宇宙飞行中, 雷达可用来控制宇宙飞船的飞行和降落, 等等。

二次大战后, 特别是 20 世纪 70 年代以来, 雷达技术有了迅速的发展, 雷达已应用于军事的各个方面。这些技术成果也同时在民用雷达方面发挥着日益增长的作用。下面列举一些军用和民用方面雷达应用的情况。