

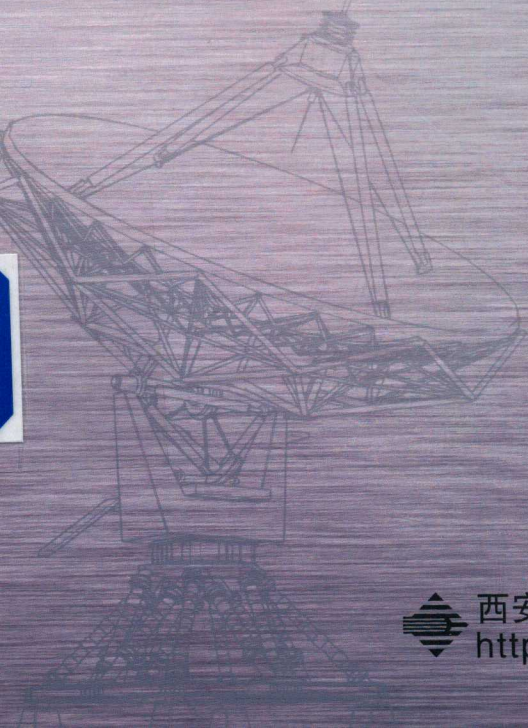
信息技术重点图书·雷达

A faint silhouette of a jet airplane in flight, positioned in the upper left corner of the cover.

*Radar Detection
and Application*

雷达探测与应用

刘涛 卢建斌 毛玲 蒋燕妮 毛滔 刘立国 编著◆



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

信息技术重点图书·雷达

雷达探测与应用

刘涛 卢建斌 毛玲 蒋燕妮 毛滔 刘立国 编著



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书系统地讲述了雷达探测及其应用方面的知识,涵盖了雷达基础篇(雷达原理、雷达系统)、雷达进阶篇(雷达信号处理、雷达数据处理)和雷达对抗篇(雷达对抗、雷达防御)。全书共8章,主要介绍了雷达的基本组成结构,雷达方程,目标距离、角度、速度的测量与应用,以及先进的雷达信号处理技术、数据处理技术和目标识别方法,最后阐述了雷达电子战的基本原理,突出实战化需求牵引,为后续雷达装备的学习、使用和作战指挥奠定坚实的基础。

本书内容充实,系统性强,理论联系实际,强化工程实践和作战应用,既可作为雷达工程专业和预警探测方向初级任职培训的入门教材,也可作为雷达工程技术和指挥人员掌握雷达系统的分析设计、作战使用并解决有关实际问题的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

雷达探测与应用/刘涛等编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2019.12
ISBN 978-7-5606-5438-6

I. ①雷… II. ①刘… III. ①雷达探测 IV. ①TN953

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 220109 号

策划编辑 杨丕勇

责任编辑 雷鸿俊

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 北京虎彩文化传播有限公司

版 次 2019年12月第1版 2019年12月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 21

字 数 494千字

印 数 1~1000册

定 价 55.00元

ISBN 978-7-5606-5438-6/TN

XDUP 5740001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本书受海军院校和士兵训练机构
教材重点建设项目资助出版

前 言

本书定位于军队初级指挥与工程技术人员,立足于全面掌握雷达基本原理及其作战应用,遵循深入浅出的授课理念,以透过现象看本质的哲学思想为指导,将雷达原理、雷达系统和雷达电子战的相关知识进行融合。

全书共8章,分为三篇:雷达基础篇(第1~4章)、雷达进阶篇(第5、6章)和雷达对抗篇(第7、8章)。雷达基础篇主要介绍雷达的基本概念、作用距离和参数测量等;雷达进阶篇主要介绍信号处理和数据处理等关键技术;雷达对抗篇给出雷达电子战的概念,最后落脚于雷达的电子防御。

第1章为绪论,介绍了雷达的基本概念及发展简史、雷达的工作原理及应用;第2章为雷达系统组成,分别对雷达发射机、雷达接收机、雷达天线和雷达显示终端等进行了介绍;第3章为雷达方程与目标检测,介绍了雷达方程、噪声中的信号检测、雷达脉冲积累、雷达电磁波传播效应及影响;第4章为雷达目标参数测量,主要介绍了目标距离测量、角度测量、速度测量及信号分辨力与测量精度;第5章为雷达信号处理,介绍了脉冲压缩技术、数字波束形成技术、合成孔径雷达技术等;第6章为雷达数据处理,介绍了雷达数据录取与预处理、雷达目标跟踪、雷达目标特性及雷达目标识别;第7章为雷达的电子威胁,介绍了雷达作战环境与电子战、雷达对抗侦察原理、雷达干扰方程与干扰手段以及新体制雷达对抗技术;第8章为雷达的电子防御,介绍了雷达反侦察方法、雷达抗干扰措施、抗反辐射攻击与反隐身措施以及经典雷达电子战实例分析。全书体系结构完整,哲学观点明确,深入浅出,既适合初学者踏入雷达专业的门槛,也适合科研人员聚焦雷达系统的物理本质。

本书由海军工程大学电子工程学院预警探测教研室组织编写。全书由刘涛设计、撰写大纲并统稿,并编写了第5章、第7章、第8章的相关内容;卢建

斌编写了第2章、第3章的相关内容；毛玲编写了第1章、第4章、第6章的相关内容；刘立国参与了第1章、第3章的修改工作；蒋燕妮参与了第2章、第5章的修改工作；毛滔参与了全书的审校工作。

在撰写本书的过程中得到了本科生杨子渊、陶佳康、王庆和王诺等的大力支持和帮助，在此我们一并表示衷心的感谢。

由于时间仓促、资料不足，加之编者水平有限，书中难免存在一些不足，恳请读者批评指正。

编 者

2019 年 8 月

目 录

第一篇 雷达基础篇

第1章 绪论	2	2.5 雷达馈线	67
1.1 雷达的基本概念及发展简史	2	2.5.1 雷达馈线的主要功能	67
1.1.1 雷达的基本概念	2	2.5.2 雷达馈线的主要组成形式	68
1.1.2 雷达发展简史	3	2.5.3 雷达馈线的主要技术指标	70
1.1.3 美军雷达命名规范	9	2.6 雷达伺服控制	71
1.2 雷达的工作原理及应用	10	2.6.1 雷达伺服控制的主要功能	71
1.2.1 雷达的工作原理	10	2.6.2 雷达伺服控制的基本组成	71
1.2.2 雷达的应用	17	2.6.3 雷达伺服控制的主要技术指标	73
1.2.3 雷达“四抗”技术与雷达发展趋势	25	2.7 雷达显示器	73
第2章 雷达系统组成	30	2.7.1 距离显示器	73
2.1 雷达基本组成概述	30	2.7.2 B型显示器	74
2.2 雷达发射机	33	2.7.3 E型显示器	75
2.2.1 雷达发射机的主要功能	33	2.7.4 平面位置显示器	75
2.2.2 雷达发射机的基本组成	33	2.7.5 情况显示器和综合显示器	75
2.2.3 雷达发射机的主要技术指标	36	第3章 雷达方程与目标检测	77
2.3 雷达接收机	38	3.1 雷达方程	77
2.3.1 雷达接收机的主要功能	38	3.1.1 雷达方程的推导	77
2.3.2 雷达接收机的基本组成	39	3.1.2 距离诸因子的定义及计算	80
2.3.3 雷达接收机的主要技术指标	41	3.1.3 搜索雷达方程和跟踪雷达方程	82
2.4 雷达天线	60	3.1.4 对海雷达方程	83
2.4.1 雷达天线的主要功能	60	3.2 雷达目标特性	85
2.4.2 雷达天线的主要类型与结构特点	61	3.2.1 雷达散射截面积的定义与典型目标的 RCS	86
2.4.3 雷达天线的方向特性	63	3.2.2 雷达散射截面积的起伏与计算方法	91
2.4.4 雷达天线的主要技术指标	65		

3.3 雷达电磁波传播特性	93	4.1.2 距离跟踪原理	125
3.3.1 大气衰减	93	4.2 角度测量	128
3.3.2 雷达直视距离和大气折射	95	4.2.1 测角方法与比较	128
3.3.3 地面或水面反射	97	4.2.2 天线波束的形状和扫描方法	131
3.3.4 电磁绕射原理	100	4.2.3 自动测角原理	138
3.3.5 电离层传播	101	4.3 动目标检测与测速	142
3.3.6 对流层散射	104	4.3.1 多普勒效应在雷达中的应用	142
3.4 噪声中的信号检测	105	4.3.2 动目标显示技术	146
3.4.1 信号检测基本原理	106	4.3.3 动目标检测与测速	150
3.4.2 恒虚警检测	111	4.3.4 脉冲多普勒技术	156
3.4.3 雷达脉冲积累	113	4.4 信号分辨力与测量精度	159
第4章 雷达目标参数测量	118	4.4.1 雷达测量精度	159
4.1 距离测量	118	4.4.2 雷达分辨力	162
4.1.1 脉冲法测距	118		

第二篇 雷达进阶篇

第5章 雷达信号处理	168	5.4.1 SAR 二维高分辨原理	186
5.1 概述	168	5.4.2 距离向脉冲压缩技术	188
5.1.1 雷达信号处理功能	168	5.4.3 SAR 成像算法实现	189
5.1.2 雷达信号处理基本流程	169	第6章 雷达数据处理	193
5.2 脉冲压缩处理	170	6.1 雷达数据录取	193
5.2.1 脉冲压缩基本原理	170	6.2 雷达目标跟踪	197
5.2.2 脉冲压缩的主要质量指标	172	6.2.1 搜索雷达多目标扫描跟踪的 基本内容	197
5.2.3 数字脉冲压缩实现方法	173	6.2.2 系统模型	199
5.2.4 相位编码信号脉冲压缩	176	6.2.3 常用跟踪滤波器	202
5.3 数字波束形成技术	182	6.3 检测前跟踪	209
5.3.1 窄带信号模型	182	6.3.1 TBD 和 DBT 的概念与比较	209
5.3.2 空间匹配滤波器	184	6.3.2 检测前跟踪算法分类与比较	214
5.3.3 阵列方向图	184	6.4 雷达目标识别	215
5.3.4 阵列增益	185	6.4.1 雷达目标识别原理	216
5.3.5 波束宽度	185	6.4.2 雷达目标识别方法	221
5.3.6 相位扫描的带宽限制	186		
5.4 合成孔径雷达技术	186		

第三篇 雷达对抗篇

第7章 雷达的电子威胁	238	7.4.4 脉冲多普勒雷达对抗手段	274
7.1 雷达电子战的基本概念	238	第8章 雷达的电子防御	277
7.1.1 雷达电子支援	239	8.1 雷达反侦察	277
7.1.2 对雷达的电子攻击	239	8.1.1 截获因子	277
7.1.3 对雷达的电子防护	241	8.1.2 雷达反侦察技术措施	278
7.2 雷达对抗侦察原理	242	8.1.3 雷达反侦察战术手段	278
7.2.1 雷达对抗侦察内涵	242	8.2 雷达抗干扰措施	279
7.2.2 侦察接收机的灵敏度及侦察作用 距离	244	8.2.1 雷达抗干扰技术	279
7.3 雷达干扰方程与干扰手段	252	8.2.2 雷达抗干扰战术	310
7.3.1 雷达干扰概述	252	8.3 抗反辐射攻击与反隐身措施	310
7.3.2 干扰方程及有效干扰空间	253	8.3.1 抗反辐射攻击技术	310
7.3.3 对雷达的有源干扰	260	8.3.2 雷达反隐身技术	318
7.4 新体制雷达对抗技术	266	8.4 经典雷达电子战实例分析	321
7.4.1 相控阵雷达对抗技术	266	8.4.1 贝卡谷地战役回顾	321
7.4.2 超宽带雷达对抗手段	267	8.4.2 贝卡谷地战役雷达电子战对抗分析	323
7.4.3 合成孔径雷达对抗手段	269		
参考文献	325		

第一章 绪论

第一篇 雷达基础篇

第1章 绪 论

本章主要介绍雷达的基本概念、发展历史、工作原理、基本组成及其应用和分类,宏观把握雷达的主要任务、需要学习掌握的主要内容和今后雷达技术的发展趋势。从知识掌握和本质理解上来说,雷达信号处理是学习雷达的关键。雷达信号处理的本质就是矢量相加,同向最大,也就是“ $1+1=2$ ”的问题。后续的脉冲积累、脉冲压缩、匹配滤波、脉冲多普勒、模糊函数、傅里叶变换、相控阵雷达技术、合成孔径雷达技术以及空域滤波技术等都是“ $1+1=2$ ”的具体体现。

1.1 雷达的基本概念及发展简史

1.1.1 雷达的基本概念

雷达是英文 Radar 的音译,源于 Radio Detection and Ranging 的缩写,原意是“无线电探测和测距”,即用无线电方法发现目标并测定它们在空间的位置,因此雷达也称为“无线电定位”。随着雷达技术的发展,雷达的任务不仅是测量目标的距离、方位和仰角,而且还包括测量目标的速度,以及从目标回波中获取更多有关目标的信息。

雷达是利用目标对电磁波的反射(或称为二次散射)现象来发现目标并测定其位置的。飞机、导弹、人造卫星、舰艇、车辆、兵器、炮弹及建筑物、山川、云雨等,都可能作为雷达的探测目标,这要根据雷达的用途而定。目标对雷达信号的反射强弱程度可以用目标的雷达截面积(RCS)来描述。通常,目标的雷达截面积越大,则反射的雷达信号功率越强。雷达截面积与目标自身的材料、形状和大小等因素有关,也与照射它的电磁波的特性有关。目标的雷达截面积的大小影响着雷达对目标的发现能力,通常雷达截面积越大的目标可能在越远的距离被雷达发现。雷达的基本原理如图 1.1.1 所示。

除了目标的回波外,雷达接收机中总是存在着一些杂乱无章的信号。这些信号称为噪声,它是由外部噪声源经天线进入接收机,以及接收机本身的内部电路共同产生的。采用先进的电子元器件和精心的电路设计可以减小这些噪声,但不可能完全消除它们。由于噪声时时刻刻伴随目标回波存在,所以当目标距离雷达很远、目标回波很弱的时候,回波就难以从噪声中被区分出来。只有当目标与雷达的距离近到目标回波比噪声足够强的时候,雷达才可能从接收机的噪声背景中发现目标的回波。雷达从噪声中发现回波信号的过程称为雷达目标检测或目标的发现。从上面的分析容易知道,雷达对目标的发现距离是有限度的。

雷达发射的电磁波信号照射目标的同时,也会照射到目标所在的背景物体上,这些背景物体的反射回波进入雷达接收机,形成无用的回波,也称为雷达杂波。例如,雨雪等自然现象形成的反射回波称为气象杂波;向地面、海面观测目标时地物和海面反射形成的杂

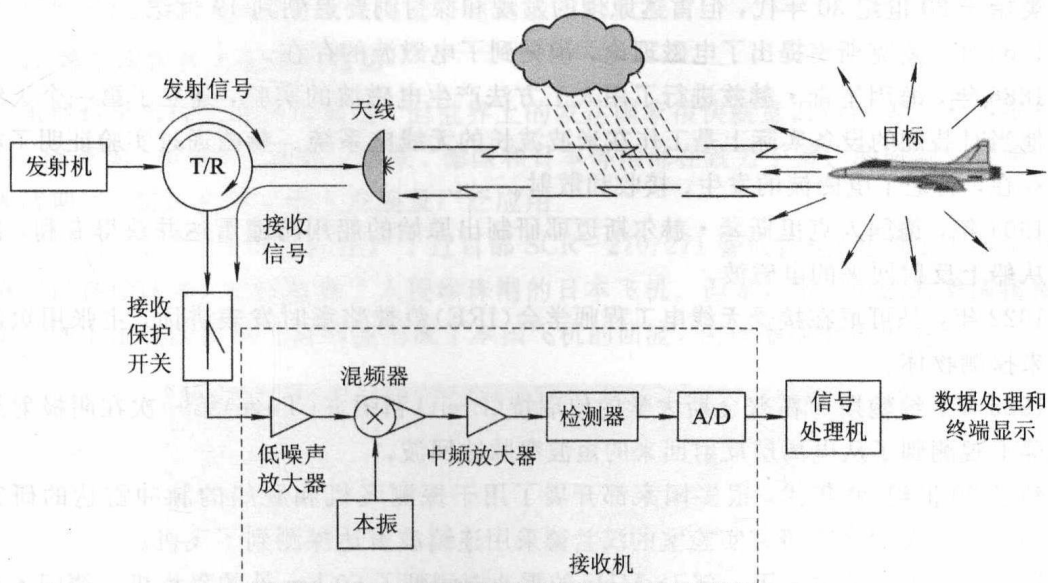


图 1.1.1 雷达工作的基本原理

波分别称为地杂波和海杂波。此外,在实际战场环境中还存在大量的有意针对雷达发射的人为电磁波信号,这些信号进入雷达接收机后,可能起到削弱雷达对目标发现能力的作用,这样的信号称为干扰。噪声、杂波、干扰都会在雷达显示器上出现,严重影响雷达对目标的观察。因此,现代雷达根据噪声、杂波、干扰与目标的不同特征,利用各种信号处理技术,消除杂波、干扰的影响,才使雷达的应用能扩展到复杂的战场环境下,保证雷达正常发现目标和测量目标参数的能力。噪声与杂波的区别可以直观地理解为:雷达不发射信号的时候,接收机噪声依旧存在,但是不存在杂波。

雷达辐射电磁能量并检测来自反射体的回波,回波信号提供了下列关于目标的信息:

- (1) 通过测量电磁波信号从雷达传播到目标并返回雷达的时间可得到目标的距离;
- (2) 目标的角度信息可以通过方向性天线(具有窄波束的天线)测量回波信号的到达角来确定;
- (3) 如果是动目标,则雷达能得到目标的轨迹或航迹,并能预测它未来的位置;
- (4) 径向动目标的多普勒效应使接收的回波信号产生频移,雷达可以根据频移将希望检测的动目标和不希望检测的固定目标区分开;
- (5) 当雷达具有足够高的分辨力时,它还能识别目标尺寸和形状的某些特性。

归纳起来,雷达在发现(检测)目标之后,其基本测量功能可以分为尺度测量和特征测量两类。尺度测量包括对目标三维坐标(距离、角度)的测量,还包括速度(或加速度)的测量;特征测量包括对目标雷达截面积、散射矩阵、散射中心分布等的测量。

1.1.2 雷达发展简史

1. 雷达原理的发现和早期雷达

在雷达出现之前,人们一般采用光学系统进行探测,但是光学系统受天气影响很大,后来出现了利用声音进行探测的设备,但是作用距离很有限。雷达作为一种军事装备服务

于人类始于 20 世纪 30 年代,但雷达原理的发现和探讨则要追溯到 19 世纪。

1864 年,麦克斯韦提出了电磁理论,预见到了电磁波的存在。

1886 年,海因里奇·赫兹进行了用人工方法产生电磁波的实验,建立了第一个天线系统。他当时装配的设备实际上是工作在米波波长的无线电系统。赫兹通过实验证明了电磁波的存在,验证了电磁波的发生、接收和散射。

1904 年,德国人克里斯琴·赫尔斯迈耶研制出原始的船用防撞雷达并获得专利,探测到了从船上反射回来的电磁波。

1922 年,马可尼在接受无线电工程师学会(IRE)荣誉奖章时发表讲话,主张用短波无线电来探测物体。

1925 年,约翰斯·霍普金斯大学的伯瑞特(Breit)和图夫(Tuve)第一次在阴极射线管荧光屏上观测到了从电离层反射回来的短波窄脉冲回波。

到了 20 世纪 30 年代,很多国家都开展了用于探测飞机和舰船的脉冲雷达的研究工作。1930 年,美国海军研究实验室的汉兰德采用连续波雷达探测到了飞机。

1935 年 2 月,英国人用一部 12 MHz 的雷达探测到了 60 km 外的轰炸机。德国人也验证了对飞机目标的短脉冲测距。

1937 年年初,英国人罗伯特·沃森·瓦特设计的作战雷达网“本土链”(Chain Home)正式部署。这是世界上第一个用于实战的雷达网,并在著名的“大不列颠空战”中发挥了重要作用。图 1.1.2 所示为 Chain Home 雷达系统。

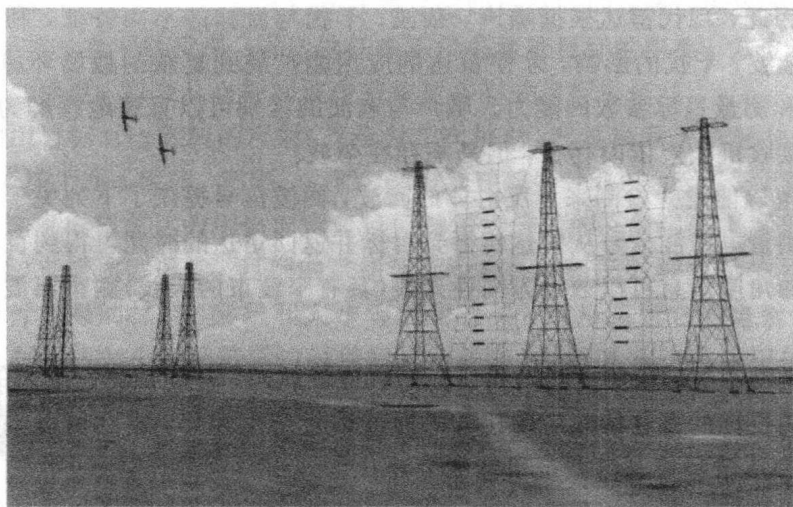


图 1.1.2 Chain Home 雷达系统

1938 年,美国信号公司制造了第一部防空火控雷达 SCR-268,它是世界上第一部真正实用的火控雷达,前后共生产了约 3000 部。

1938 年,美国无线电公司研制出了第一部实用的舰载雷达(XAF),安装在美国“纽约”号战舰上,它对海面舰船的探测距离为 20 km,对飞机的探测距离为 160 km。

1939 年,英国在一架飞机上装了一部工作频率为 200 MHz 的雷达,用来监视入侵的飞机。这可称得上是世界上第一部机载预警雷达。当时的英国在研制厘米波功率发生器件方面居于世界领先地位,并首先制造出了能产生 3000 MHz 频率 1 kW 功率信号的磁控管。

高功率厘米波器件的出现，大大促进了雷达技术的发展。

2. 第二次世界大战中的雷达

虽然最早出现的是民用雷达，但世界上的发达国家很快就意识到雷达巨大的军事应用价值，除英国、美国外，法国、苏联、德国和日本等国都在致力于雷达的研制。在第二次世界大战期间，雷达获得了很大发展及广泛应用。

1941年12月，美国已经生产了近百部 SCR-270/271 警戒雷达(见图 1.1.3)，其中一部就架设在珍珠港，它探测到了入侵珍珠港的日本飞机。但是，那天执勤的美国指挥官误把荧光屏上出现的日本飞机回波当成了本国飞机的回波，由此酿成惨重损失。

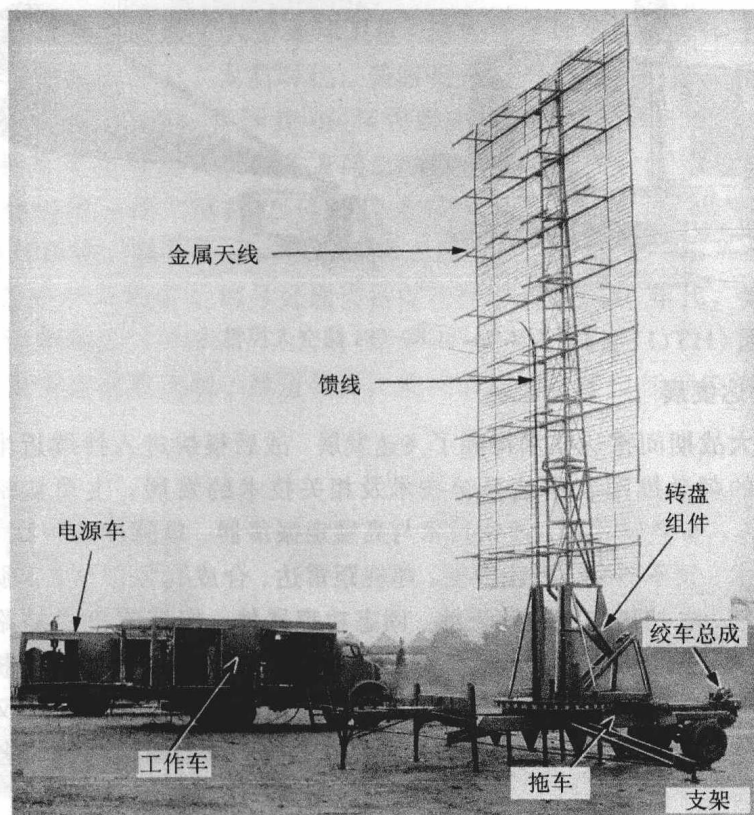


图 1.1.3 SCR-270 警戒雷达

在第二次世界大战中，由于战争的需要，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。到了战争末期，雷达已在海、陆、空三军中得到了广泛应用。借助英国的帮助，美国在雷达方面的研制大大超过了德国和日本，保证了同盟国的胜利。当时的雷达不仅能在各种复杂条件下发现数百千米外的入侵飞机，而且还能精确地测出它们的位置。那时雷达已进入控制领域，火炮射击和飞机轰炸等都借助雷达进行瞄准控制。统计结果表明，在第二次世界大战初期，高射炮每击落一架飞机平均要消耗 5000 发炮弹。到了大战末期，尽管飞机性能已经大为提高，但采用火控雷达控制高射炮进行射击，每击落一架飞机平均只需用 50 发炮弹，命中率提高到了 100 倍。

二战中的雷达大多数工作于超高频(或更低的频段)。海军的雷达一般工作在 200 MHz 频率上。到战争后期，工作在 400 MHz、600 MHz 和 1200 MHz 频率上的雷达也已经投入使用。

1943 年,高功率微波磁控管研制成功并投入生产之后,微波雷达正式问世。从英国研制成功磁控管到美国麻省理工学院辐射实验室研制出第一部 10 cm 波长的实验雷达,前后只用了一年时间。首先制造成功的只是 XT-1 型外场试验装置,到 1943 年中期美国就研制成功了针状波束圆锥扫描 S 波段的 SCR-584 防空火控雷达(见图 1.1.4)。这种雷达的波束宽度约为 4° (约 70 mrad),跟踪飞机的精度约为 0.86° (约 15 mrad)。这样的精度已经能满足高炮射击指挥仪的要求,而且光学跟踪仍然作为雷达的补充,使得雷达伺服系统控制自动跟踪的性能足以使由雷达控制的火炮在射程范围内具有很高的杀伤力。

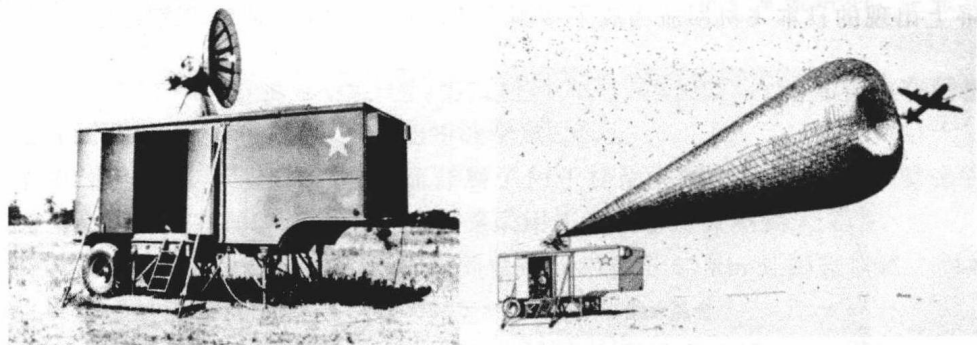


图 1.1.4 SCR-584 防空火控雷达

3. 战后的雷达发展

第二次世界大战期间雷达技术得到了飞速发展,战后很快进入持续近半个世纪的冷战时期。军备竞赛的刺激推动着雷达系统技术及相关技术的发展,主要包括:高功率速调管、低噪声行波管、参量放大器、锁相技术与高稳定振荡器、单脉冲测角技术、动目标显示和脉冲多普勒技术、频率捷变、极化捷变、超视距雷达、合成孔径雷达、窄脉冲技术与宽带信号的产生和处理、电扫描与相控阵天线、固态功率器件、超高速集成电路与专用集成电路、数字计算机、数字信号处理与高速信号处理芯片、电波传播与电离层探测、印制电路与微电子电路、薄膜电路和厚膜电路、电子设计自动化。这些技术的发展又促使雷达进一步获得了更加广泛的应用。从第二次世界大战结束至今,每个时期内都有各种标志性的产品相继研制成功。

1) 20 世纪 50 年代的雷达

20 世纪 40 年代雷达的工作频段由高频(HF)、甚高频(VHF)发展到了微波波段,直至 K 波段(波长约 1 cm)。到 50 年代末,为了有效地探测卫星和远程导弹,需要研制超远程雷达,雷达的工作频段又返回到了较低的甚高频(VHF)和超高频(UHF)波段。在这些波段上雷达可获得兆瓦级的平均功率,采用尺寸达百米以上的大型天线。目前,大型雷达主要用于观测月亮、极光、流星和金星等。

脉冲压缩在 20 世纪 40 年代被提出,但直到 50 年代才得以应用于雷达系统。最早的高功率脉冲压缩雷达采用相位编码调制,把一个长脉冲分成 200 个子脉冲,各子脉冲的相位按照伪随机码选择为 0° 或 180° 。脉冲压缩技术的出现,使得雷达在提高距离分辨力的同时也能够保证较大的作用距离。

20 世纪 50 年代还出现了合成孔径雷达,它利用装在飞机或卫星上相对来说较小的侧视天线,产生地面上的一个条带状地图。机载气象观测雷达和地面气象观测雷达也问世于

这一时期。机载脉冲多普勒雷达是 20 世纪 50 年代初提出的构想, 50 年代末就成功地应用于“波马克”空空导弹的下视、下射制导雷达。

2) 20 世纪 60 年代的雷达

20 世纪 60 年代的雷达技术是以第一部电扫描相控阵天线和后期开始的数字处理技术为标志的。天线波束的空间扫描可以采用机械扫描和电子控制扫描的办法。电扫描比机械扫描速度快、灵活性好。

第一种实用的电扫描雷达采用频率扫描天线, 其中最为著名的是美国 IIT 公司生产的 AN/SPS-48 雷达(参见图 1.1.5)与苏联的“顶板”雷达。它们在方位向采用机械扫描, 而仰角向采用电扫描。

1957 年, 苏联成功地发射了人造地球卫星, 这表明射程可达美国本土的洲际弹道导弹已进入实用阶段, 人类进入了太空时代。美苏相继开始研制外空监视和洲际弹道导弹预警用的超远程相控阵雷达。美国在 60 年代研制了 AN/SPS-85 相控阵雷达(见图 1.1.6), 它的天线波束可在方位和仰角方向上实现电扫描。AN/SPS-85 是正式用于探测和跟踪空间物体的第一部大型相控阵雷达, 它的发展证明了数字计算机对相控阵雷达的重要性。60 年代后期, 数字技术的发展使雷达信号处理开始了一场革命, 并一直延续到现在。今天, 几乎所有的雷达信号处理设备都是数字式的。60 年代, 美国海军研究实验室还研制了探测距离在 3700 km 以上的“麦德雷”高频超视距(OTH)雷达, 这个研制成果证明了超视距雷达探测飞机、弹道导弹和舰艇的能力, 还包括确定海面状况和海洋上空风情的能力。

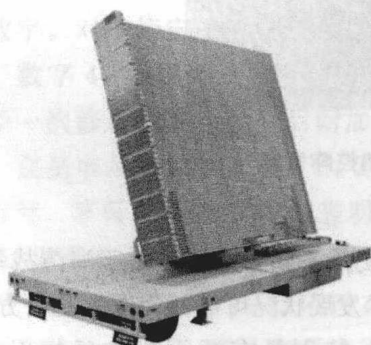


图 1.1.5 美军的 AN/SPS-48 频率扫描三坐标雷达



图 1.1.6 美军的 AN/SPS-85 相控阵雷达

3) 20 世纪 70 年代的雷达

20 世纪 50 年代末实现技术突破, 60 年代得到大力发展的几种主要相参雷达, 如合成孔径雷达、相控阵雷达和脉冲多普勒雷达等, 在 70 年代又有了新的发展。合成孔径雷达的计算机成像是 70 年代中期实现技术突破的, 目前高分辨力合成孔径雷达已经扩展到民用。装在海洋卫星上的合成孔径雷达已经获得分辨力为 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ 的雷达图像, 用计算机处理后能提供地理、地质和海洋状态信息。在 1 cm 波段上, 机载合成孔径雷达的分辨力已可达到约 0.09 m。相控阵雷达和脉冲多普勒雷达的发展都与计算机的高速发展密不可分。70 年代投入正常运转的 AN/FPS-108“丹麦眼镜蛇雷达”是一部有代表性的大型高分辨力相控阵雷达(见图 1.1.7), 美国将该雷达用于观测和跟踪苏联堪察加半岛靶场上空多个再入的弹道导弹弹头。

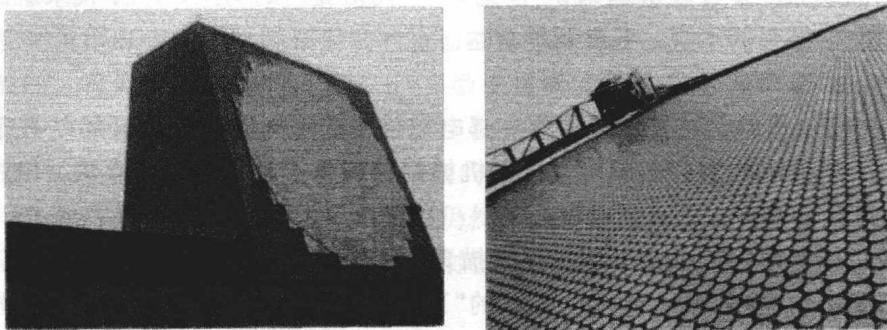


图 1.1.7 AN/FPS-108“丹麦眼镜蛇雷达”

4) 20 世纪 80 年代的雷达

20 世纪 80 年代, 相控阵雷达技术大量用于战术雷达, 包括美国陆军“爱国者”系统中的 AN/MPQ-53(见图 1.1.8)、海军“宙斯盾”系统中的 AN/SPY-1 和空军的 B-1B。

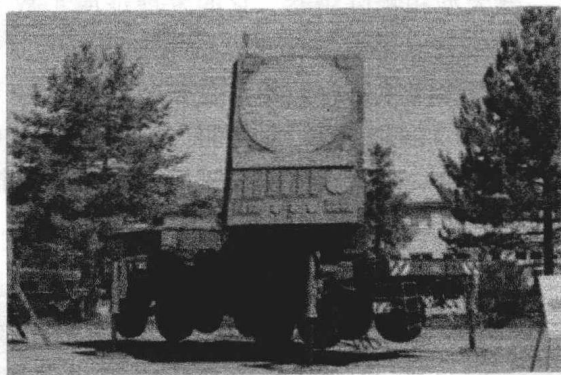


图 1.1.8 AN/MPQ-53 相控阵雷达

5) 20 世纪 90 年代以后的雷达

20 世纪 90 年代以后, 尽管冷战结束, 但局部战争仍然不断, 特别是由于海湾战争的刺激, 雷达又进入了一个新的发展时期。90 年代以后雷达技术发展状况可概括为以下几个方面:

(1) 军用雷达面临电子战中反雷达技术的威胁, 特别是有源干扰和反辐射导弹的威胁。现代雷达发展了多种抗有源干扰与抗反辐射导弹的技术, 包括自适应天线方向图置零技术、自适应宽带跳频技术、多波段共用天线技术、诱饵技术、低截获概率技术等。

(2) 隐身飞机的出现, 使微波波段目标的雷达截面积减小了 20~30 dB, 要求雷达的灵敏度相应提高同样的量级。反隐身雷达已采用低频段(米波、短波等)雷达技术、双(多)基地雷达。

(3) 巡航导弹与低空飞机飞行高度低至 10 m 以下, 目标截面积小到 $0.1 \sim 0.01 \text{ m}^2$ 。因此, 对付低空入侵是雷达技术发展的又一挑战。采用升空平台、宽带雷达、脉冲多普勒及毫米波等技术能有效对付低空入侵。

(4) 成像雷达技术的发展, 为目标识别创造了前所未有的机会。目前工作的合成孔径雷达分辨力已达 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 的系统也已研制成功, 为大面积实时侦察与目标识别创造了条件, 多频段、多极化合成孔径雷达已经投入使用。

(5) 航天技术的发展, 为空间雷达技术的发展提供了广泛的机会。高功率的卫星警戒