

LEIDA JISHU JICHU

雷达技术基础

■ 陈运涛 黄寒砚 陈玉兰 等 编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

任职教育教材

雷达技术基础

陈运涛 黄寒砚 陈玉兰 等编

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书主要介绍雷达的系统组成、原理、技术以及典型雷达装备方面的基础知识。全书分7章,内容包括:概述、雷达传输线与天线系统、雷达发射与接收系统、雷达终端与伺服系统、目标参数的测量、现代雷达技术、典型陆军雷达装备等。本书深入浅出,通俗易懂,图文并茂。为辅助学员的学习,设计了教学参考,并提供了图片表格形式的内容小结。此外,还配备了丰富的习题,供课后使用。

本书可作为任职教育雷达维修工程专业学员的专业课教材,也可作为工程技术类电子工程专业学员的参考资料,还可供部队、修理机构有关技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

雷达技术基础 / 陈运涛等编. —北京: 国防工业出版社, 2014.7

ISBN 978-7-118-09527-2

I. ①雷… II. ①陈… III. ①雷达技术 IV. ①TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 140313 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 14¼ 字数 380 千字

2014 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

前 言

从 20 世纪 30 年代开始,雷达作为一种军事装备开始服务于人类,始终保持着方兴未艾、蓬勃发展的态势。时至今日,在国防、军事和民用的各个领域,雷达都发挥着举足轻重的作用。它是国防的“千里眼”,是主要的信息获取设备;是精确打击武器系统的重要组成部分,是武器系统发挥作战效能的有力保证;是遥感、测绘、气象、天文、空中交通管制、地下探测等诸多领域不可或缺的支撑工具。可以说,没有任何一种探测器具具有雷达那样的探测距离,并能在恶劣气候条件下精确地测定目标位置;也没有任何一种探测器能像雷达那样灵活地应用并具有多种用途。那么雷达究竟是什么?它由哪几部分组成?涉及哪些相关的技术和应用呢?这就是本教材将要阐述的内容。

作为一种集成了现代电子科学技术先进成果的高科技系统,雷达技术绝不简单,特别是随着科学技术的迅猛发展和应用领域的不断拓展,雷达技术的知识体系已经且必将更为庞大。对一个初学者而言,要想在较短的时间里对现代雷达的原理、技术、系统和应用建立起比较全面、准确的认识,是一件非常困难的事情。而对于士官任职教育学员这样一类特殊的学习者而言,难度无疑会更大。尽管国内外关于雷达技术的优秀教材和参考资料很多,但大多是面向专业技术人员使用的,直接用于培养任职教育学员显然不合适。为此,结合士官任职教育的特点和规律,组织编写了本教材。

本教材力求做到“实”、“通”、“新”。

“实”就是着眼应用,实用为先,以培养“懂维修、会保障”的技术人才为目标,以雷达维修和管理中实际有用为原则,突出为后续维修课程服务,提供必须、够用的原理知识。

“通”就是站在初学者的立场,力求精简原理,深入浅出,通俗易懂,但也不能把这本教材编写成雷达科普读物,相关的知识点尽量不用数学推导而是通过形象直观的波形、图像和多媒体形式来体现和解释。

“新”就是面向新装备,新维修理论,详细介绍现役及即将装备的雷达中用到的新技术、新器材、新体制,并适当讲述代表现代雷达发展方向的雷达技术。

本教材由陈运涛主编,黄寒砚、陈玉兰、张华、王瑞、王义参加了编写,并广泛吸纳了有关专家和历届学员的意见和建议。马晓岩担任本书审稿工作。周永亮、傅翰参加了本教材的校订。在此,对各级领导、机关以及专家和学员一并表示感谢。

由于经验有限,教材难免存在疏漏之处,敬请读者批评指正。

编者

2014 年 4 月

目 录

第 1 章 雷达概述	1
1.1 雷达发展简史	1
1.2 雷达的功能和基本工作原理	14
1.3 雷达的组成和简要工作过程	19
1.4 雷达的性能参数	22
1.5 雷达的应用和分类	29
小结	34
习题	35
第 2 章 雷达传输线与天线系统	36
2.1 雷达的传输线与微波元件	36
2.2 雷达天线	45
小结	57
习题	58
第 3 章 雷达发射与接收系统	59
3.1 雷达发射机	59
3.2 雷达接收机	76
小结	97
习题	98
第 4 章 雷达终端与伺服控制系统	99
4.1 雷达显示器	99
4.2 雷达伺服系统	115
小结	126
习题	127
第 5 章 目标参数的测量	128
5.1 雷达方程与目标的发现	128
5.2 雷达测距原理	137
5.3 雷达测角原理	146
5.4 雷达测速原理	158
小结	163
习题	164

第 6 章 现代雷达技术	165
6.1 脉冲压缩技术	165
6.2 合成孔径技术	171
6.3 动目标显示技术	174
6.4 脉冲多普勒技术	179
6.5 相控阵技术	185
6.6 雷达抗干扰技术	195
小结	205
习题	205
第 7 章 典型陆军雷达装备	206
7.1 目标指示雷达	206
7.2 火控雷达	213
7.3 侦察校射雷达	217
7.4 战场侦察雷达	219
7.5 气象雷达	223
小结	226
习题	226
参考文献	227

第 1 章 雷达概述

教学参考

本章将从雷达的发展简史、发展趋势出发,简要介绍雷达的基本组成、工作原理、性能参数、雷达的应用和分类,以构建雷达的基本框架。

本章在教学过程中,要围绕以下几个问题逐步展开:① 雷达的基本概念是什么?从雷达的主要作用和工作过程来回答。② 雷达实现其主要作用的物理基础是什么?③ 根据雷达工作过程可推出其基本组成吗?④ 雷达要实现其作用需要满足什么性能指标?⑤ 雷达在实际中有什么具体应用和分类?在逐步深入回答这些问题时,会涉及很多新名词、新概念,这些知识在后面的章节中会进一步详细描述。

蝙蝠可以灵巧地避开飞行途中的障碍物并准确地追踪感兴趣的小昆虫,雷达可以准确地发现上百千米之外隐藏在云层中的敌机。这两种非凡的本领都基于一个非常简单而古老的原理:根据物体反射的回波来探测物体并确定与物体之间的距离。其中,蝙蝠利用的是超声波,而雷达利用的是电磁波。在现实生活中,诸如飞机、导弹、人造卫星、舰船、车辆、建筑物、地面以及山川、云雨等物体都反射电磁波。雷达就是利用目标对电磁波的反射现象来发现目标并确定其位置的。

雷达这个名称最早可追溯于 20 世纪 30 年代后期,源于第二次世界大战中美国海军使用的一个保密代号。雷达是英文“RADAR”的音译,是“Radio Detection and Ranging”的缩写,原意是无线电探测与测距。随着雷达技术的发展,雷达的任务已不仅限于目标探测和目标距离的测量,而且还包括测量目标的方位角、俯仰角、速度以及从目标回波中获取更多有关目标特征的信息。

按照 IEEE 的标准定义,雷达是通过发射电磁波信号,接收来自其威力覆盖范围内目标的回波,并从回波信号中提取位置和其他信息,以用于探测、定位以及有时进行目标识别的电磁系统。该定义是“无线电探测和测距”的扩展,进一步地将雷达功能具体化。

尽管雷达的基本概念貌似简单,但是雷达却是一种集成了现代电子科学技术成就的相当复杂的高科技系统,绝对不简单。近年来,大量的新理论、新技术、新器件在雷达中被广泛采用,特别是计算机技术的应用,给现代雷达带来了根本性的变革。

1.1 雷达发展简史

一直以来,人们都希望能站得更高、望得更远。前者导致了飞机的诞生,而后者则是雷达产生的本能动因。雷达的产生和发展经历了一个较为漫长的过程,它依赖于三个方面的因素:① 对雷达的需求和要求的不断发展与变化;② 物理理论和雷达理论的创新与深化;③ 电子技术和基础元器件技术的进步与发展。

1.1.1 雷达原理的发现

雷达作为一种军事装备服务于人类是 20 世纪 30 年代的事情,但雷达原理的发现和探讨,却要追溯到 19 世纪的末期。

1864 年,麦克斯韦(Maxwell)提出了电磁理论,预见到了电磁波的存在。1886 年,海因里希·赫兹(Heinrich Hertz)通过实验证明了电磁波的存在,并建立了第一个天线系统,验证了电磁波的发生、接收和散射。他当时装配的设备实际上是工作在米波波长的完整无线电系统,采用了终端加载的偶极子作为发射天线,谐振环作为接收天线,如图 1-1 所示。

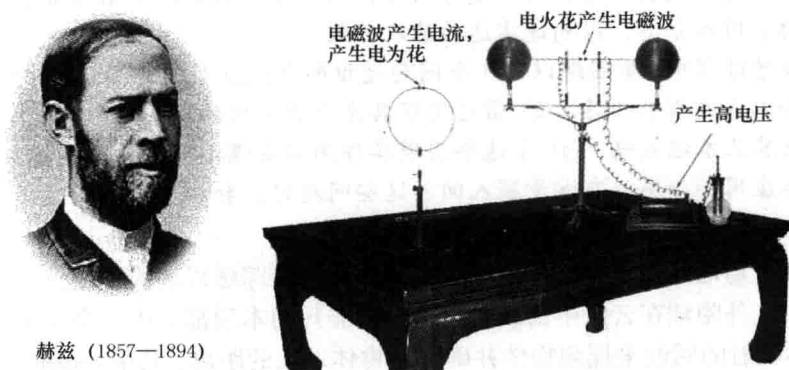


图 1-1 赫兹和赫兹实验装置

电磁理论的发展为雷达的出现奠定了物理理论基础,但是研制雷达的初衷却是基于航海的需求。19 世纪末期,航海事业的飞速发展对船用防撞装置的研制提出了很大的需求。

1903—1904 年,德国克里斯琴·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,如图 1-2 所示。

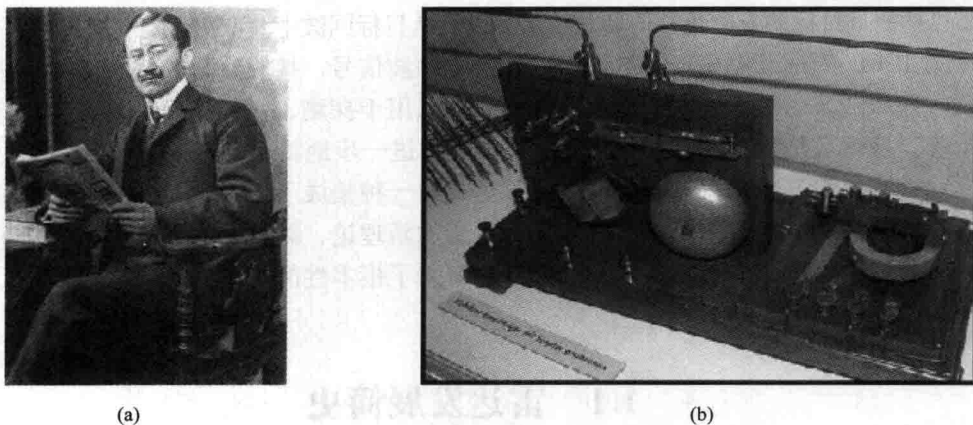


图 1-2 1903 年克里斯琴的船用防撞装置

1922 年,马可尼在接受无线电工程师学会(ORE)荣誉奖章时主张用短波无线电来探测物体。同年,美国海军研究实验室的 A.H.泰勒(A.H. Taylor)和 L.C.杨(L.C. Young)用一部波长为 5m 的连续波试验装置探测到了一只木船。由于当时缺乏有效的隔离方法,只能将收发装置分置,这实际上是一种双基地雷达。

1924 年, 英国的 G.阿普尔顿和 M.A.巴卡特为了探测大气层的高度而设计了一种阴极射线管, 并附有屏幕。

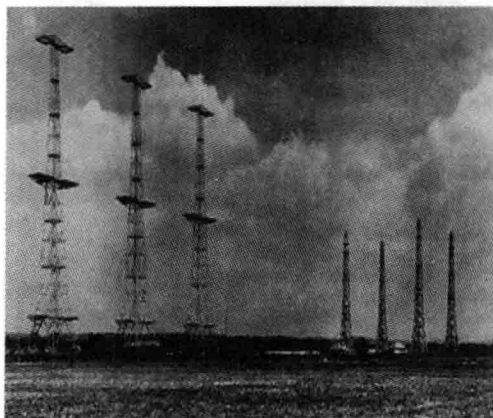
1925 年, 英国霍普金斯大学的 G.伯瑞特和 M.杜威第一次在阴极射线管荧光屏上观测到了从电离层反射回来的短波窄脉冲回波。

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 (Hyland) 采用连续波雷达探测到了飞机。1934 年, 美国海军研究实验室的 R.M.Page 第一次拍下了从 1.6km 外一架单座飞机反射回来的电磁脉冲的照片。1935 年 2 月, 英国用一部 12MHz 的雷达探测到了 60km 外的轰炸机。德国也验证了对飞机目标的短脉冲视距。

1.1.2 誉为“天之骄子”的二战雷达

尽管产生研制雷达的初衷以及早期雷达都是民用, 但雷达真正得到发展却是因为战争的需要。在第一次世界大战中, 军用飞机大量投入战争, 给防空带来了很大的威胁。随着飞机速度的提高, 急需一种能够发现远距离飞机的设备, 于是在第二次世界大战开始之前, 美英等国就开始了研制雷达的计划。

1937 年初, 英国罗伯特·沃森·瓦特 (Robert Watson-Watt) 设计的作战雷达网“本土链”正式部署。如图 1-3 所示, 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。“本土链”的投入为英军赢得了 15min 的预警时间, 最终英军以 900 架飞机抵抗住了德军 2600 架战斗机的疯狂进攻。



(a)



(b)

图 1-3 本土链

1938 年, 美国无线电公司 (RCA) 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是 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, 这是世界上第一部机载预警雷达。

1941 年 12 月日本偷袭珍珠港, 那时美国实际上已经生产了近百部 SCR-270 警戒雷达和 SCR-271 警戒雷达 (图 1-4)。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。可惜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自己飞机的回波, 由此酿成惨重损失。

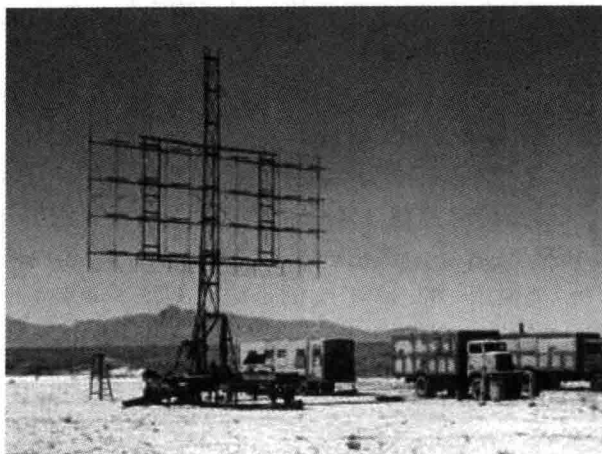
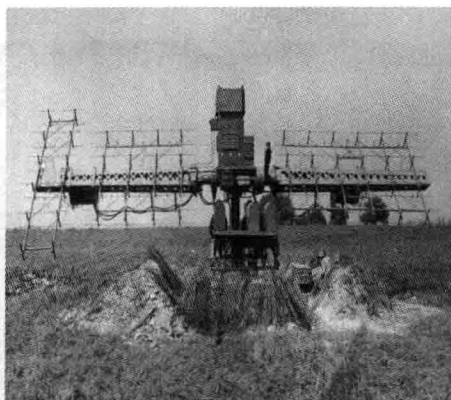


图 1-4 SCR-270 警戒雷达

第二次世界大战时期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。与此同时，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。1938 年，美国信号公司制造了世界上第一部真正实用的防空火力控制雷达 SCR-268，如图 1-5 所示。其工作频率为 205MHz，探测距离达 180km，前后共生产了约 3000 部。



(a)



(b)

图 1-5 第一部防空火控雷达 SCR-268

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。到了第二次世界大战末期，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，命中率整整提高了 100 倍。

雷达技术的发展除了要靠军事驱动之外，还依赖于大功率微波技术的发展。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，并率先制造出了能产生 3000MHz、1kW 功率信号的磁控管。高功率厘米波器件的出现，极大促进了雷达技术的发展。1940 年，英国的科学家在访美时向美国提供了磁控管，并建议美国研制微波机载雷达和防空火控雷达。

1943年,在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。低功率速调管在很长一段时期里一直只用作超外差接收机的本地振荡器。从英国研制成功磁控管到美国麻省理工学院辐射实验室制作出第一部10cm波长的试验雷达,前后只用了一年时间,首先制造成功的是XT-1型外场试验装置,到1943年中期美国研制成功了针状波束圆锥扫描S波段的SCR-581防空火控雷达。这种雷达的波束宽度约为 4° (70mrad),跟踪飞机的精度约为 0.86° (15mrad)。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,足以使雷达控制的火炮在射程范围内具有很高的杀伤力。

第二次世界大战中,空用和海用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200MHz频率上。到第二次世界大战后期,工作在400MHz、600MHz和1200MHz频率上的雷达也已经投入使用。1942年,美国发明了单脉冲测角体制,同年出现了动目标显示(MTI)雷达。

综上所述,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,促使雷达在海、陆、空三军中得到广泛应用,在影响战争的态势中发挥了重要的作用,因此,雷达也被誉为“第二次世界大战的天之骄子”。

1.1.3 战后雷达技术飞速发展

第二次世界大战后,很快进入持续近半个世纪的冷战时期。由于超级大国军备竞赛和航空航天技术对雷达的巨大需求,对雷达提出了更高的要求:①探测距离远,以应对飞行器速度的提高;②高数据率,高精度和高分辨力;③高抗干扰能力,应对“四大威胁”(见1.1.4所述);④多目标处理能力;⑤多功能。这促使雷达系统及相关技术得到了进一步的发展,而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1cm)。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,可采用线尺寸达百米以上的大型天线。大型雷达已开始应用于观测月亮、极光、流星和金星等。

40年代发展起来的单脉冲原理、脉冲压缩原理到50年代已成功应用于雷达系统。如美国的AN/FPS-16单脉冲精密跟踪雷达,其角跟踪精度可以达到0.2mrad(约0.1密位),这样的角跟踪精度即使以现在的标准来看也是相当高的。

20世纪50年代,大功率速调管放大器开始应用于雷达,其发射功率比磁控管大两个数量级。50年代还出现了合成孔径雷达(SAR)、机载气象回避雷达、地面气象观测雷达和机载脉冲多普勒雷达。

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或电子控制扫描的办法,电扫描比机械扫描速度

快、灵活性好。第一部实用的电扫描雷达采用频率扫描天线，应用最广泛的是 AN/SPS-48 频率扫描三坐标雷达。它是方位上机械扫描与仰角上电扫描相结合的，仰角上提供大约 45° 的覆盖范围。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，它的天线波束可在方位和仰角方向上实现相控阵扫描。

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。

对动目标显示 (MTI) 技术加以改进后，机载动目标显示雷达应用到了飞机上，这是 1964 年在美国海军的 E-2A 预警机上实现的。20 世纪 60 年代，美国海军研究实验室还研制了探测距离在 3700km 以上的“麦德雷”高频超视距雷达，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。

用雷达抗干扰装置来对付敌方干扰的措施也起始于 60 年代，最典型的例子就是美国陆军的“奈基 II 型”防空武器系统所用的雷达。这个系统中的 L 波段对空监视雷达，它利用一个大型天线，在很宽的频带内具有高平均功率，有战时使用的保留频率，并有相干旁瓣对消器。该系统还包括一部 S 波段点头式测高雷达、S 波段截获雷达、X 波段跟踪雷达和 Ku 波段测距雷达，使电子干扰更加困难。

3. 20 世纪 70 年代的雷达

随着计算机技术的发展，20 世纪 70 年代，雷达的性能日益提高，应用范围也持续拓宽。

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（相干）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。E-3 预警机机载脉冲多普勒雷达的研制成功，使机载预警雷达有了重大发展。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，美国将该雷达用于观测和跟踪前苏联勘察加半岛靶场上空多个再入的弹道导弹弹头。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，并进入空间飞行器。

由于采用了固态小型计算机而使得雷达尺寸缩小，能力增强。20 世纪 70 年代，每部雷达都可能有自己的自动检测和跟踪装置。同时，由于引进了声表面波延迟线，可把脉冲压缩到几个毫微秒，高分辨力脉冲压缩的实用性也得到了提高。

应用上，20 世纪 70 年代越南战争期间，雷达开发工作中出现了一个有趣的副产品，即利用甚高频宽带雷达探测地下坑道。此后，这种雷达一直供探测地下管道和电线电缆等民事应用。在空间应用方面，雷达被用来帮助“阿波罗”飞船在月球上着陆；在卫星方面，雷达被用作高度计，测量地球表面的不平度。“鱼叉”和“战斧”系统中用的巡航导弹制导雷达也是这一时期出现的。

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，这期间研制成功的主要相控阵雷达包括美国陆军的“爱国者”系统中的 AN/MPQ-53、海军“宙斯盾”系统中的 AN/SPY-1 和空军的 B-1B，它们都已进入了批量生产。L 波段和 L 波段以下的固态发射机已用于 AN/TPS-59、AN/FPS-117、AN/SPS-40 等雷达中。在空间监视雷达方面，图 1-6 所示的“铺路爪” (PAVE PAWS) 全固态大型相控阵雷达 (AN/FPS-115) 是雷达的一个重大发展。

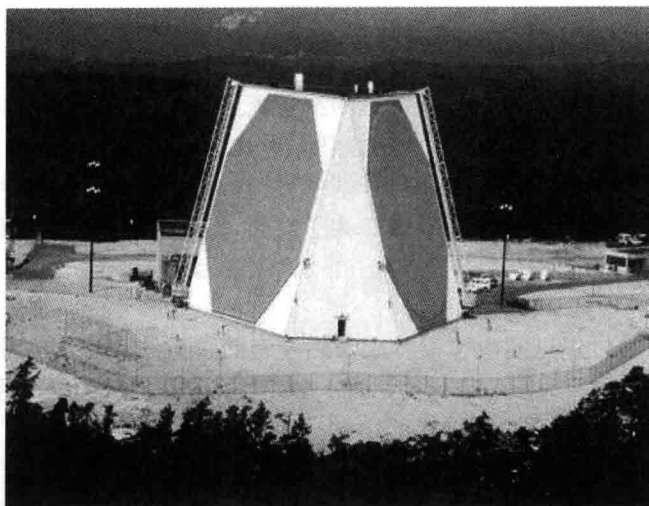


图 1-6 美“铺路爪”预警雷达

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 (RCS) 减小了 10~30 倍，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) 基地雷达技术、无源定位技术等。

(3) 巡航导弹与低空飞机飞行高度低至 10m 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。采用升空平台技术、宽带雷达技术、脉冲多普勒雷达技术及毫米波雷达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也已经投入使用。

(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。高功率的卫星监视雷达、空基侦察与监视雷达、空间飞行体交会雷达等成为雷达家族新的成员。

(6) 探地雷达是雷达发展的另一重要方向。目前已有多种体制的探地雷达，用于地雷、地下管道探测和高速公路质量检测等。树林下及沙漠下隐蔽目标的探测已取得重要的实验成果，UHF/VHF 频段的超宽带合成孔径雷达已取得突破性进展。

(7) 毫米波雷达在各种民用系统中 (如海港及边防监视、船舶导航、直升机防撞等) 大显身手。欧美已开发出 77GHz 和 94GHz 的汽车防撞雷达，为大规模生产汽车雷达创造了条件。在研制的用于自动装置的雷达中，最高频率已达 220GHz。

(8) 雷达多功能与多用途。在现代雷达应用中，由于作战空间和时间的限制，以及快速反应能力和系统综合性的要求，雷达必须具备多功能和综合应用的能力。例如，要求一部雷达能同时对多目标实施搜索、截获、跟踪、识别及武器制导或火控等功能；要求雷达与通信、指挥控制、电子战等功能构成综合体等。

1.1.4 雷达的生存和对抗

自从雷达开始投入战争,雷达与反雷达的抗争就应运而生,严重影响了雷达与目标的生存与否。总体来看,当前雷达面临着“四大威胁”:快速应变的电子侦察及强烈的电子干扰,具有掠地、掠海能力的低空、超低空飞机和巡航导弹,使雷达截面积成百上千倍减小的隐身飞行器,快速反应自主式高速反辐射导弹。为了对付“四大威胁”的挑战,雷达已经并在继续开发一些行之有效的新手段

1. 综合电子干扰与抗干扰技术

在现代战争中,对付先进的电子设备武器系统有两种方法:① 火力摧毁手段,也称硬杀伤;② 电磁干扰(ECM)手段,也称软杀伤。ECM是指为了探测敌方无线电电子装备的电磁信息,削弱或破坏其使用效能所采取的一切战术、技术措施。

电子干扰是人为有意识地对敌方雷达发射电磁波信号,或用某种器材对电磁波进行反射、吸收,进而使雷达迷盲或性能降低。雷达靠接收回波发现目标,那么敌人可以施放干扰电磁波,使雷达分不清目标,也可以产生假的目标回波欺骗雷达。因此,电磁干扰一般分为有源干扰和无源干扰。目前对雷达实施的众多干扰中,有源干扰对雷达功能的威胁更大。

电子干扰在战争中发挥了越来越大的作用,电子干扰技术也得到了飞速的发展。现在干扰机的干扰频率已完全覆盖雷达发射频率,干扰幅度大于雷达发射波的幅度,可以全方位同时干扰10~15个目标。各国军队有专门的电子战部队和电子战飞机。

1991年海湾战争中,多国部队在空战前24h,用EF-111A和EA-6B电子战飞机,从远距离和近距离航线干扰伊拉克军队的预警雷达和引导雷达,用EC-130H电子战飞机的有源和无源干扰手段,扰乱伊军的通信、雷达系统,使得伊军雷达失去侦察和警戒作用,无线电通信中断,进而使得伊拉克的防空系统处于瘫痪状态。

ECM技术的发展,催生了反干扰技术的发展。雷达抗干扰的目的是将影响雷达正常工作的各种干扰信号减弱到能容许的程度,或者完全避开干扰,保障雷达正常工作。为此而采用的主要技术如下:

(1)在天线方面,把握抵御外界干扰的第一道防线,利用收发天线的方向性,采用能产生雷达空间鉴别的技术,如低副(旁)瓣、副(旁)瓣消隐、副(旁)瓣对消、波束宽度控制、天线覆盖范围和扫描控制等。

(2)在发射机方面,适当地利用和控制发射信号的功率、频率和波形。这些技术措施包括:①增加有效辐射功率,进而增加信号干扰功率比,是一种对抗有源干扰的强有力手段。但雷达的发射要采用功率管理,以减小平时雷达被侦察的概率。②频率捷变或频率分集,前者是指雷达在脉冲与脉冲间或脉冲串与脉冲串之间改变发射频率,后者是指几部雷达发射机工作于不同的频率而将其接收信号综合利用。这些技术可以降低被敌方侦察时的可检测度,并且加重敌方电子干扰的负荷,而使干扰更加困难。③发射波形编码,包括脉冲重复频率跳变、参差编码和脉间编码等,这些技术使得欺骗干扰更加困难,因为敌方将无法获悉或无法预测发射波形的精确结构。

(3)在体制上,可采用稀布阵综合脉冲孔径雷达技术、无源探测技术等。

2. 低空/超低空突防与反突防

低空/超低空系指地面之上300m以下的空间。由于雷达一般是利用电磁波的匀速直线传播特性来定位,利用低空/超低空突防具有一些特殊优势:① 地形遮挡。地球是一个球体,

受地球曲率影响，雷达不能发现地平线以下的目标，这样可大大缩减雷达的有效探测距离。例如，雷达对高度为 1300km 的洲际弹道导弹的发现距离可达 5000km 以上，但对于高度为 150m 超低空飞行的飞机，雷达的发现距离仅为几十千米。② 强表面杂波。要探测低空目标，雷达势必会受到强地面/海面反射的背景杂波的干扰。③ 多径效应。雷达电磁波的直射波、地面反射波和目标反射波的组合会产生多径干涉效应，导致仰角上波束分裂。

因此，低空/超低空是现代防空火力最薄弱的空域。在英阿马岛战争中，英军的“谢菲尔”号导弹巡洋舰第一次参战，阿军利用“飞鱼”导弹优越的低空突防性能，发射了两枚“飞鱼”导弹，以数米的高度做掠海飞行，英舰没用超低空预警雷达设备，无法发现导弹而被一举击沉，给英舰以毁灭性打击。军事专家认为，目前飞机和巡航导弹低空突防最佳高度在海上为 15m，在平原地区为 60m，在丘陵和山地为 120m。

雷达反低空突防方面的措施，归纳起来有两大类：① 技术措施，主要是反杂波技术，如设计反杂波性能优良的低空监视雷达，研制利用电离层折射特性的超视距雷达来提高探测距离（比普通微波雷达的探测距离可大 5~10 倍，达到 3000~4000km）；② 战术措施，主要是物理上的反遮挡，如通过提高雷达平台高度来增加雷达水平视距，延长预警时间，或利用雷达组网，发挥雷达群体优势来对付低空突防飞行目标。

3. 隐身与反隐身技术

所谓隐身技术是指通过采用特殊材料、特殊结构或特殊技术减小目标的雷达反射截面积（RCS），从而使雷达的作用距离大大减小。目前，隐身技术在特点及方法上，大体有以下类型：① 外形隐身，减少雷达反射截面积；② 加表面吸波涂层；③ 用吸波材料作为飞行器的结构材料；④ 采用阻抗加载技术；⑤ 采用等离子体。目前隐身技术集中在厘米波段。

根据雷达方程，雷达发现目标的距离与雷达反射截面积的四次方根成正比。在其他参数不变的情况下，当目标的雷达反射截面积减少到原来的 1/10 时，雷达的作用距离将缩短为原来的 50%。隐身技术大大缩短了防御方的预警系统的有效探测距离和预警时间，从而增加了防御的难度。

隐身飞机是 20 世纪 80 年代以来军用雷达面临的最严重的电子战威胁。美国的 B-52 轰炸机的雷达反射面积为 100m^2 ，70 年代中期研制的 B1-B 战略轰炸机，其 RCS 只有原 B-52 的 3%~5%，从而使雷达对它的探测距离下降 58%。80 年代以来，飞行器隐身技术有了突破性进展，第三代隐身飞机 F-117A（战斗轰炸机）和 B-2（隐身轰炸机）的 RCS 下降 20~30dB，使雷达的探测距离下降为原来的 1/3~1/6。表 1-1 列出了几种隐身技术和非隐身飞机雷达截面积的比较。

表 1-1 几种作战飞机的雷达反射截面积

机型	RCS/ m^2	隐身技术
B-52	100	无
海盜旗	15	无
FB-1H	7	无
F-4	6	无
S-27	3	无
B-1B	0.75	是
B-2	0.1	是
F-117A	0.025	是

美国在 1991 年海湾战争和 1999 年科索沃战争中，使用了 F-117A 隐身轰炸机和 B-2 隐身战略轰炸机。2001 年对阿富汗的报复战争中，还使用了 F-22 隐身战斗机。

但是，隐身性不是绝对的。例如，它主要是减小从正前方（鼻锥）附近水平 $\pm 45^\circ$ 、垂直 $\pm 30^\circ$ 范围照射时的后向散射截面，但目标其他方向特别是前向散射 RCS 明显增大。另外，涂覆的吸波材料有一定的频带范围，通常是 2~18GHz。也就是说，涂覆的吸波材料对长的波长是无效的。当飞行器尺寸和工作波长可以相比时，外形设计对隐身的作用会明显下降。这就是说，米波或更长波长的雷达具有良好的反隐身能力。

因此，反隐身可能采用的一些技术手段如下：

(1) 根据隐身飞机是针对厘米波雷达设计的弱点，采用米波雷达、毫米波雷达、激光雷达抗隐身，可研制新体制雷达，如超视距雷达、长波雷达等。

(2) 由于隐身飞机的隐身能力相对于不同的观察角度是不相同的，可采取空中预警机、双-多基地雷达等措施反隐身。

(3) 采用功率合成技术和大压缩比脉冲压缩技术，增加发现隐身飞机的能力。

(4) 实现雷达组网。利用多用途、多体制雷达的组网，形成整体雷达预警、指挥系统，集中处理目标信息，提高对目标发现概率和预警能力。

(5) 在战术上可以采用被动红外、激光、电视、跟踪杂波源等多种测量目标的手段相结合反隐身。

4. 反辐射导弹（ARM）与 ARM 对抗

反辐射导弹又称为反雷达导弹，它利用雷达辐射的电磁波束进行被动制导，从而准确地击中雷达。ARM 沿着雷达波束对雷达进行攻击，除可以直接摧毁雷达及其阵地外，还杀伤雷达操作手，给雷达操作手造成极大的心理压力，使其不敢长时间开机，严重影响了战斗力。

美国和苏联非常重视反辐射武器的发展，他们认为：在未来的战争中，对付雷达等先进电子武器系统的最好办法是发展反辐射武器系统。20 世纪 60 年代研制的“百舌鸟”ARM 是第一代产品，它使用的是无源比相雷达引信，在越南和中东战争中使用，发挥了惊人的作用，有效地摧毁了圆锥扫描的火控雷达。目前，ARM 发展到了第三代，采用了计算机与人工智能技术，具有记忆跟踪能力，能攻击关机后的雷达，能自动切换制导方式，自动搜索和截获目标，大大提高了对目标的命中精度和杀伤能力。海湾战争中，多国部队仅 ARM 就发射了数千枚，使伊方雷达多数被摧毁。

反辐射无人机是 ARM 的最新发展，它是在无人机上配装被动雷达引导头或战斗部，可以按照预先编订的程序，在战场上空或需攻击雷达的上空巡航，时间可达 6h，一旦雷达开机，就立即实施攻击。

ARM 堪称雷达的克星，但也不是无懈可击，其致命弱点是它依赖于雷达辐射的电磁波进行制导。通过一系列的战术技术手段，灵活运用战法，可以有效地防止 ARM 对雷达的摧毁。一方面可以采用被动的抗 ARM 措施，设法使 ARM 难以截获并跟踪雷达信号；另一方面，还可用有源或无源诱饵使 ARM 不能击中目标，或者施放干扰，破坏和扰乱 ARM 导引头的工作。具体而言，有 5 种类型的抗 ARM 方式：

(1) “隐”：建立隐蔽雷达站和电台，在关键时刻突然启用；严格控制雷达的使用时机和

使用方向，尽量缩短并无规律地调整雷达开机时间和值班顺序；加强电磁情报的保密工作，对雷达的频率等技术参数严格保密等。

(2)“分”：将雷达基地中的发射机和接收机、显示器等设备分别配置于不同空间和地点，设置“双基地雷达”或“多基地雷达”；分布式相控阵雷达拥有众多的辐射源子阵，使 ARM 因接收信号太多、太乱而无法精确测定雷达发射源子阵的位置，无法同时对多个子阵辐射源进行准确跟踪，即使个别子阵遭到摧毁，整个雷达系统仍能正常工作。

(3)“网”：将多部不同体制、不同频段、不同程式、不同极化的雷达在空间做适当疏散配置，再借助各种通信手段连接成网，对抗 ARM 的攻击。越南战争期间，越军就曾采取雷达组网的办法，多部雷达轮流开机和关机，来防止美国的“百舌鸟”ARM 攻击。

(4)“骗”：设置假辐射源，隐真示假、以假乱真，诱骗 ARM 攻击，从而保护真雷达。科索沃战争中，南联盟军队设置了几百个假雷达阵地，不仅有效地保存了部分雷达，而且使北约部队分不清真假，白白浪费了大量 ARM。伪装也可以起到保护雷达的作用，采用烟幕、云雾天气，减少辐射信号，降低被 ARM 跟踪的可能性。

(5)“动”：适时机动雷达，以提高其战场生存能力。通常 ARM 发射后，即进入自导状态，依靠目标辐射信号不断修正飞行方向来攻击预知位置的雷达，而机动式雷达使 ARM 难以精确定位。俄军拥有的大批防空雷达中，机动式雷达已成为主导力量，如 425 单炮搜索雷达可在行进中搜索工作和射击。此外，采用频率捷变、多频工作和脉冲重复频率跳变技术，使雷达发射信号的频率随机变化，均能增加 ARM 探测和跟踪的难度。

综上所述，“四大威胁”对雷达提出了更高的要求，在对抗“四大威胁”的进程中，雷达技术和雷达体制不断革新，已经也必将进入一个又一个新的高度。对抗“四大威胁”必然是上述一系列先进技术的综合运用，并非某一单项技术手段所能奏效。在采用新技术的基础上，各种新体制雷达，如无源雷达、双（多）基地雷达、机（星）载预警雷达、稀布阵雷达、多载频雷达、噪声雷达、谐波雷达、微波成像雷达、毫米波雷达、激光雷达及冲激雷达等，与红外技术、电视技术等构成一个以雷达、光电和其他无源探测设备为中心的极为复杂的综合空地一体化探测网，达到互相补充和信息资源共享。

1.1.5 我国雷达技术的发展历程

1. 雷达技术在我国的发展

从我国雷达技术和产品发展总体来说，大致经历了修配、仿制、自行设计和发展提高四个阶段。

1) 修配阶段（1949—1953 年）

这一阶段以开创基业和修配美、日旧雷达为主要标志。1949 年 5 月，我军接管了国民党的雷达研究所，标志着新中国雷达工业的发展从此揭开了序幕。

新中国成立后，我防空部队急需雷达。不久，抗美援朝战争开始，前方需要各种雷达设备，国家对雷达研究所从人力、物力等方面大力支持，利用缴获的雷达器材和美、日在第二次世界大战中留下的旧雷达进行维修和补缺配套，装备部队使用。这些修复的雷达绝大多数是警戒雷达，也有炮瞄雷达、用于高炮或探照灯引导的美国早期单目标跟踪雷达、舰艇上搜索海面活动目标雷达。后期也修理过少量苏式雷达。