高等学校电子信息类规划教材

雷达系统

向敬成　张明友　编著

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

需要全本请访问 www.ertongbook.com

内 容 简 介

本书论述现代雷达体制，兼述雷达波形和雷达信号检测等理论，还介绍了能反映近代雷达变革的新技术和新体制。

全书共 7 章。第 1 章概述；第 2 章论述雷达信号检测与恒虚警率处理；第 3 章论述脉冲多普勒雷达；第 4 章论述脉冲压缩雷达；第 5 章论述相控阵雷达；第 6 章论述合成孔径雷达；第 7 章简要介绍其他雷达体制。

本书内容全面，题材新颖，论述简明，由浅入深，注重基本理论与实际应用的联系，可供从事电子和雷达工程的科技人员阅读，也可作为与高等院校电子工程有关专业的教材。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，翻版必究。

图书在版编目(CIP)数据

雷达系统/向敬成等编著. —北京：电子工业出版社，2001.5
ISBN 7-5053-6251-8

Ⅰ. 雷… Ⅱ. 向… Ⅲ. 雷达-基本知识 Ⅳ. TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 59309 号

丛 书 名：高等学校电子信息类规划教材
书　　名：雷达系统
编 著 者：向敬成　张明友
责任编辑：张荣琴
特约编辑：孙　俊
排版制作：电子工业出版社计算机排版室
印 刷 者：
装 订 者：
出版发行：电子工业出版社　URL：http://www.phei.com.cn
　　北京市海淀区万寿路 173 信箱　邮编 100036
经　　销：各地新华书店
开　　本：787×1092　1/16　印张：18　字数：460 千字
版　　次：2000 年 5 月第 1 版　2000 年 5 月第 1 次印刷
书　　号：ISBN 7-5053-6251-8 / TN·1390
印　　数：4 000 册　　定价：28.00 元

凡购买电子工业出版社的图书，如有缺页、倒页、脱页、所附磁盘或光盘有问题者，请向购买书店调换；
若书店售缺，请与本社发行部联系调换。电话　68279077

前　言

《雷达系统》是高等院校电子类雷达和电子对抗等专业的主干专业课程之一。它是在《雷达原理》课程的基础上，较详细地论述现代雷达的体制和应用。

本教材系由无线电技术与信息系统教材编审委员会电子系统编审小组评选审定，并推荐出版，责任编委为西安电子科技大学杨万海教授。

本教材由电子科技大学（成都）向敬成教授担任主编，西安电子科技大学戴树荪教授担任主审。

本课程的参考学时数为50～60学时。第1章概述雷达的性能参数和技术参数及它们的关系，并论述雷达信号的模糊函数和雷达分辨力；第2章论述雷达信号检测与恒虚警率处理；第3章论述脉冲多普勒雷达；第4章论述脉冲压缩雷达；第5章论述相控阵雷达；第6章论述合成孔径雷达；第7章简要介绍连续波雷达、单脉冲雷达、边扫描边跟踪雷达、频率捷变雷达、频率分集雷达、超宽带雷达、超视距雷达、双基地雷达和毫米波雷达等体制。由于本教材各章之间有相对独立性，使用本教材时可根据情况取舍内容。本教材适用对象为电子学与通信学科有关研究生，本科高年级学生及科技人员。

本教材第1章、第5章由张明友编写，第2章由向敬成编写，第3章由汪学刚编写，第4章由陈辅新编写，第6章由张明友、韩春林编写，第7章由张明友、王意青编写。向敬成统编全稿。

在本教材编写中，戴树荪教授对教材的结构和内容提出了宝贵的修改意见和建议，在此表示诚挚的感谢。在本教材编写过程中还得到陈天麒教授、邱文杰教授、王建国副教授、胡美莉副教授、张扬副教授的帮助，在此致以谢意。

由于编者水平有限，书中难免有错误和不当之处，殷切希望读者批评。

编　者

2000年5月

出 版 说 明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作，根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》，我们组织各有关高等学校、中等专业学校、出版社，各专业教学指导委员会，在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上，根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求，编制了《1996～2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报，经各学校、出版社推荐，由各专业教学指导委员会评选，并由我部教材办送各专指委、出版社审核确定的。本轮规划教材的编制，注意了将教学改革力度较大，有创新精神、特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需，尚无正式教材的选题优先列入规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时，选择了一批对学科发展具有重要意义，反映学科前沿的选修课程、研究生课程教材列入规划，以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验，这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足，希望使用教材的学校、教师、同学和广大读者积极提出批评和建议，以不断提高教材的编写、出版质量，共同为电子信息类专业教材建设服务。

原电子工业部教材办公室

目　录

第 1 章　概述 …… (1)
1.1　现代雷达发展史上的一些重大事件 …… (1)
1.2　雷达的主要性能参数和技术参数 …… (3)
1.3　雷达的威力区与低被截获概率性能 …… (14)
1.4　模糊函数与雷达分辨力 …… (24)
第 2 章　雷达信号检测 …… (39)
2.1　检测过程 …… (39)
2.2　匹配滤波器 …… (43)
2.3　检波器 …… (46)
2.4　多脉冲积累 …… (49)
2.5　两种实用的二进制检测器 …… (63)
2.6　自动检测 …… (65)
第 3 章　脉冲多普勒雷达 …… (77)
3.1　脉冲多普勒雷达的基本概念 …… (77)
3.2　脉冲多普勒雷达的杂波 …… (79)
3.3　脉冲多普勒雷达信号处理 …… (85)
3.4　脉冲多普勒雷达数据处理 …… (92)
3.5　脉冲多普勒雷达的距离性能 …… (107)
第 4 章　脉冲压缩雷达 …… (112)
4.1　概述 …… (112)
4.2　线性调频脉冲压缩 …… (115)
4.3　相位编码脉冲压缩 …… (139)
第 5 章　相控阵雷达 …… (151)
5.1　概述 …… (151)
5.2　相控阵列的基本原理 …… (151)
5.3　相控阵雷达的基本组成 …… (156)
5.4　相位扫描系统的组成及工作原理 …… (158)
5.5　有源相控阵雷达 …… (173)
5.6　相控阵雷达技术的优缺点及发展趋势 …… (182)
第 6 章　合成孔径雷达 …… (187)
6.1　概述 …… (187)
6.2　合成孔径雷达原理 …… (188)
6.3　合成孔径雷达原理的另一种解释 …… (193)
6.4　高分辨力成像技术——信号处理 …… (202)
6.5　合成孔径雷达的系统考虑 …… (209)
6.6　SAR 全系统组成 …… (215)

需要全本请访问 www.ertongbook.com

6.7 SAR 技术的发展现状 …… (217)
6.8 ISAR 雷达的基本原理简介 …… (219)
第 7 章 其他若干现代雷达体制简介 …… (227)
7.1 连续波雷达 …… (227)
7.2 单脉冲雷达 …… (231)
7.3 边扫描边跟踪雷达 …… (242)
7.4 频率捷变雷达和频率分集雷达 …… (254)
7.5 超宽带雷达 …… (260)
7.6 超视距雷达 …… (266)
7.7 双基地雷达 …… (271)
7.8 毫米波雷达 …… (274)
参考文献 …… (278)

第1章 概 述

雷达是集中了现代电子科学技术各种成就的高科技系统。众所周知，雷达已成功地应用于地面（含车载）、舰载、机载方面，这些雷达已经和正在执行着各种军事和民用任务。近年来，雷达应用已经向外层空间发展，出现了空间基（卫星载，航天飞机载，宇宙飞船载）雷达。目前正在酝酿建立比地面预警雷达、机载预警雷达和超视距预警雷达更优越的星载预警监视雷达。同时雷达也向空间相反方向发展，出现了各种探地雷达，它已经或将要应用于探雷、资源勘探、地下构造"窥探"、地下危险物品侦察等方面。另外，民用各部门诸如气象、天文、遥感测绘、船只导航、直升机和汽车防撞、交通管制等领域中，雷达的应用也越来越广泛，而且在数量上将远大于军用。

雷达（Radar）是"Radio Detection and Ranging"缩写的音译。其基本功能是利用目标对电磁波的散射而发现目标，并测定目标的空间位置。近年来，由于雷达采用了一些新理论、新技术和新器件，雷达技术进入了一个新的发展阶段。特别是电子计算机的应用，给现代雷达带来了根本性的变革。雷达的功能已超出了"无线电检测和测距"的含义，它还可以提取有关目标的更多信息，诸如测定目标的属性、目标的识别等。

本章在《雷达原理》中已介绍过雷达的基本概念、基本功能和主要组成部分的基础上，着重介绍雷达的性能参数与技术参数的关系，并简要介绍雷达反对抗和低被截获概率性能方面有关的概念，最后讨论模糊函数与雷达分辨力。

1.1 现代雷达发展史上的一些重大事件

首先，我们回顾一下现代雷达发展史上的一些重大事件：

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

1903～1904 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 3 100 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，将该反射回波信号误认为是友军飞机，铸成了大悲剧。

20 世纪 30 年代，除英国、美国外，法国、苏联、德国和日本同时致力于雷达的研制。第二次世界大战期间，在英国的帮助下，美国在雷达方面的研制大大地超过了德国和日本，并在保证同盟国的胜利方面发挥了重要作用。在二次世界大战末期，由于微波磁控管的研制成功和微波技术在雷达中的应用，使雷达技术得到飞速的发展。与此同时，由于二次大战中雷达所起的作用很大，因此出现了对雷达的电子对抗，研制了大量的各种频段的对雷达进行电子侦察与干扰的装备，并成立了反雷达的特种部队。

从 20 世纪 50 年代末以来，由于航天技术的飞速发展，飞机、导弹、人造卫星以及宇宙飞船等均采用雷达作为探测和控制手段。尤其是 20 世纪 60 年代中研制的反洲际弹道导弹系统提出了高精度、远距离、高分辨力和多目标测量的要求，使雷达技术进入蓬勃发展的时期。

当前雷达面临着所谓“四大”威胁，即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；使雷达散射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。因此，对雷达的要求越来越高。首先它应减少雷达信号被电子环境监测器(ESM)、反辐射导弹(ARM)截获的概率，使雷达信号更难于被这些装置发现和跟踪。同时，雷达应保证实时、可靠地从极强的自然干扰(杂波)和人为干扰中检测大量目标。由于目标的雷达截面积从很低值(“隐身”目标)到相当高值(大舰只、大飞机或强杂波)的范围内变化，所以还要求雷达有很大的工作动态范围和很高的虚警鉴别力，即使在多目标(如群目标袭击)环境中亦如此。此外，还应当采用目标分类和威胁估计，并将被处理的数据有效地传送给电子计算机和终端录取及显示装置，且要简便易行。

“四大”威胁的出现和发展并非意味着雷达的“末日”到来。为了对付这些挑战，雷达界已经并在继续开发一些行之有效的新技术，例如，频率、波束、波形、功率、重复频率等雷达基本参数的捷变或自适应捷变技术；功率合成、匹配滤波、相参积累、恒虚警处理(CFAR)、大动态线性检测器、多普勒滤波等技术；低截获概率(LPI)技术；极化信息处理技术；扩谱技术；超低旁瓣天线技术；多种发射波形设计技术；数字波束形成技术等。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的。在采用上述新技术的基础上，已经或正在研制各种新体制雷达，诸如，无源雷达、双(多)基地雷达、相控阵雷达、机(或星)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、激光雷达以及冲击雷达等，并且与红外技术、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，充分利用联合监视网在频率分集、空间分集和能量分集上的特点，在实现坐标和时间的归一化处理基础上，达到互相补充和信息资源共享。由于提取的是来自若干传感器的信息，而不是其中一个传感器单独给出的数据，所以大大提高了系统的目标测量和识别、反隐身、抗干扰和反摧毁的能力，从而使“四大”威胁同样会面临极度的困境。这就是事物发展的规律，雷达技术和反雷达技术必将在相互斗争中前进和发展。

当前对于雷达的另一个要求是多功能与多用途。在现代雷达应用中，由于作战空间和时间的限制，加之快速反应能力的要求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。

图 1.1 示出目前雷达各主要部分可采用的先进技术(数字技术已应用于雷达各组成部分,故未特别注明)。

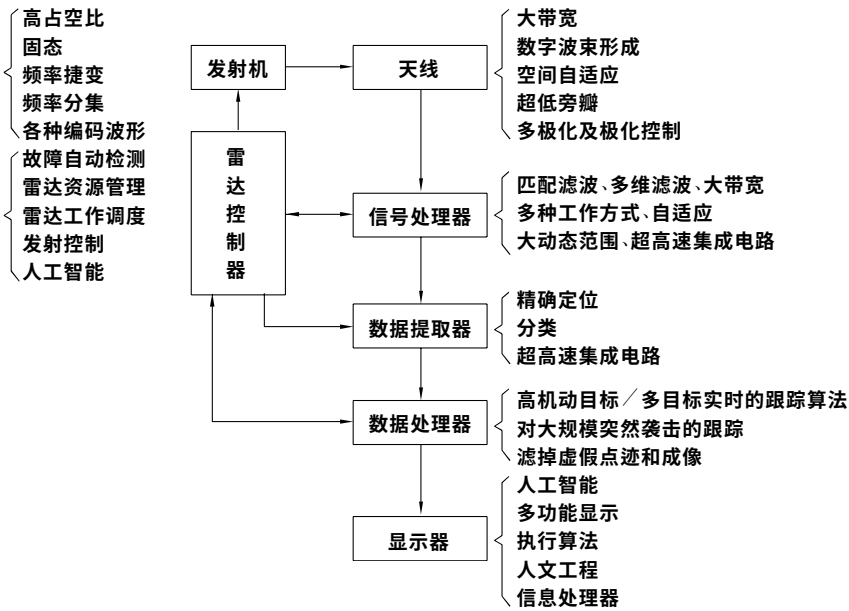


图 1.1　雷达各主要部分可采用的先进技术

1.2　雷达的主要性能参数和技术参数

典型脉冲雷达的框图如图 1.2 所示。按照常规雷达工程的习俗,雷达可分为七个分系统。在比较复杂的系统中,雷达的工作受计算机控制,由同步装置启动各个专门动作,从而控制发射时序、接收机选通和增益调整、信号处理和显示。同步装置控制调制器给射频(RF)放大器加上高压脉冲,与此同时来自激励器的 RF 激励信号加到该放大器上。由此产生的高功率射频脉冲通过传输线送往收发开关,再通过收发开关把能量送往天线向空间辐射。图中所示天线为反射面型,由伺服放大器驱动天线基座并控制其机械转动。也可以使用固定式的阵列天线,辐射波束采用电扫描。天线起着将电磁能量耦合到大气中并接收由目标散射回来的电磁能量的作用,它通常会形成一个集中向某一给定方向传播电磁波的波束。位于天线波束内的物体或目标将会截取一部分传播的电磁能量,且将被截取的能量向各个方向散射,其中有些能量会向雷达的方向反射(后向散射),从而发现目标并测定其位置、速度等参数。

1.2.1　雷达的主要性能参数和技术参数

雷达的主要战术性能参数如下:

1. 雷达的探测范围

雷达对目标进行连续观测的空域,叫做探测范围,又称威力范围,它决定于雷达的最小可测距离和最大作用距离,仰角和方位角的探测范围。

2. 测量目标参数的精确度或误差

精确度高低是以测量误差的大小来衡量的。测量方法不同精确度也不同。误差越小,精

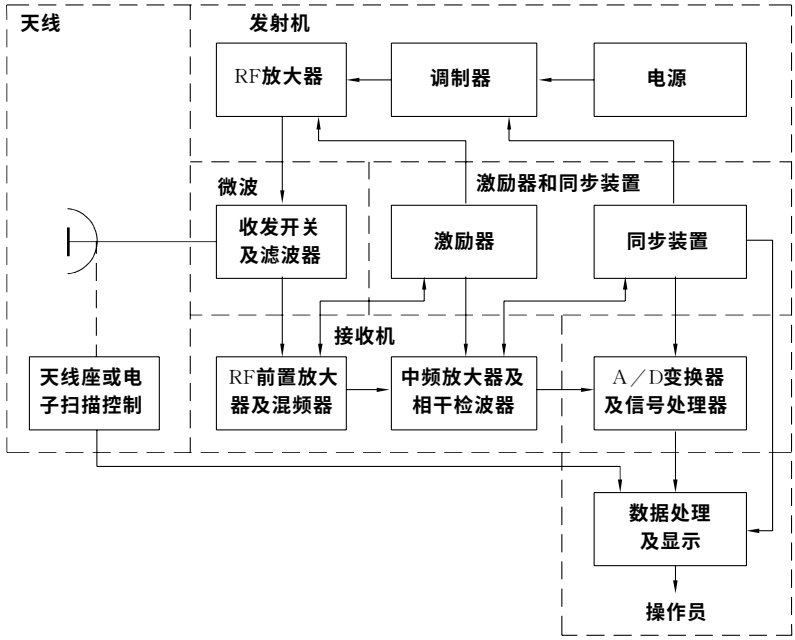


图 1.2　典型脉冲雷达框图

确度越高。雷达测量精确度的误差通常可分为系统误差、随机误差和疏失误差。所以往往对测量结果规定一个误差范围，例如，规定距离精度 $R'=(\Delta R)_{\min}/2$；最大值法测角精度 $\theta'=(1/5\sim1/10)\theta_{0.5}$，等信号法测角精度比最大值法高，对跟踪雷达，单脉冲制为 $(1/200)\theta_{0.5}$，圆锥扫描制为 $(1/50)\theta_{0.5}$。（其中 $(\Delta R)_{\min}$ 为距离分辨力，$\theta_{0.5}$ 为半功率波束宽度）

3. 分辨力

这是指对两个相邻目标的区分能力。两个目标在同一角度但处在不同距离上，其最小可分区分的距离（$\Delta R_{\min}$）称为距离分辨力，如图 1.3(a)所示。其定义为：在匹配滤波的雷达中，当第一个目标回波脉冲的后沿与第二个目标的回波脉冲的前沿相接近以致不能区分出是两个目标时，作为可分辨的极限，这个极限间距就是距离分辨力，一般认为是：

$$(\Delta R)_{\min}=\frac{c\tau}{2} \tag{1-1}$$

上式表明，由于光速 c 是常数，所以 τ（脉冲宽度）越小距离分辨力越好。若要通过信号处理来改善距离分辨力，则发射信号的带宽愈大愈好。

为提高距离分辨力，需采用窄脉冲，如图 1.3(b)所示。例如，$\tau=1\mu s$ 时，$(\Delta R)_{\min}=150m$。若要求 $(\Delta R)_{\min}=15m$，则需采用 $\tau=0.1\mu s$ 的窄脉冲。

两个目标处在相同距离上，但角位置有所不同，最小能够区分的角度称为角分辨力（在水平面内的分辨力称为方位分辨力，在铅垂面内的分辨力称为俯仰角分辨力），如图 1.3(c)所示。它与波束宽度有关，波束愈窄，角分辨力愈高。

4. 数据率

数据率是雷达对整个威力范围完成一次探测（即对这个威力范围内所有目标提供一次信息）所需时间的倒数。也就是单位时间内雷达对每个目标提供数据的次数，它表征着搜索雷达和三坐标雷达的工作速度。例如，一部 10s 完成对威力区范围搜索的雷达，其数据率为每分钟 6 次。

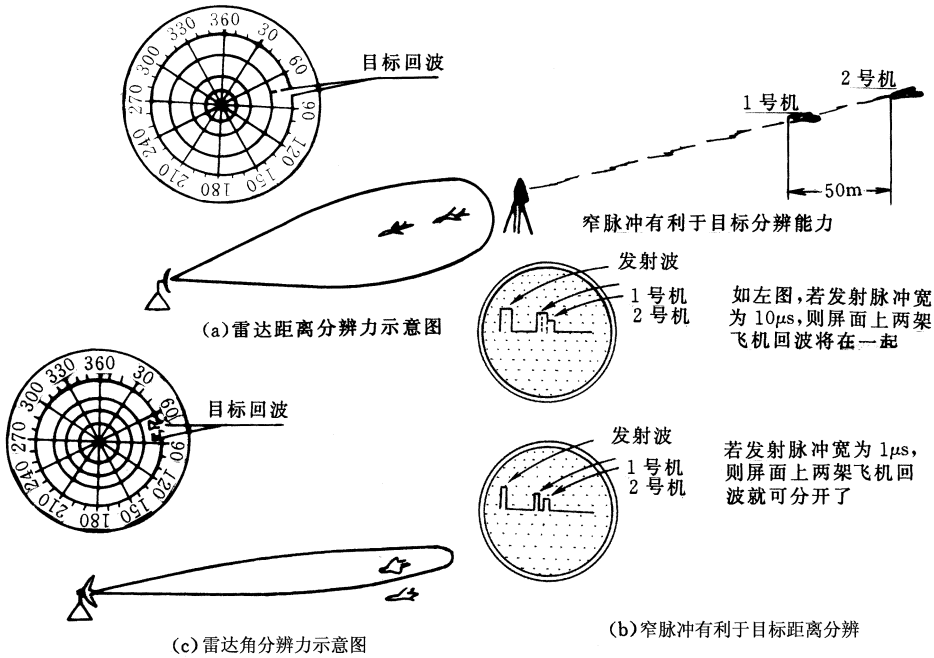


图 1.3　雷达距离分辨力

5. **抗干扰能力**

雷达通常在各种自然干扰和人为干扰(ECM)的条件下工作，其中主要是敌方施放的干扰(无源干扰和有源干扰)。这些干扰最终作用于雷达终端设备，严重时可能使雷达失去工作能力。所以近代雷达必须具有一定程度的抗干扰能力。

6. **工作可靠性**

雷达要能可靠地工作。硬件的可靠性，通常用两次故障之间的平均时间间隔来表示，称为平均无故障时间，记为 MTBF。这一平均时间越长，可靠性越高。可靠性的另一标志是发生故障以后平均修复时间，记为 MTTR，它越短越好。在使用计算机的雷达中，还要考虑软件的可靠性。军用雷达还要考虑战争条件下雷达的生存能力。

7. **体积和重量**

总的说来，希望雷达的体积小、重量轻。体积和重量决定于雷达的任务要求、所用的器件和材料。机载和空间基雷达对体积和重量的要求很严格。

8. **功耗及展开时间**

功耗指雷达的电源消耗总功率。展开时间指雷达在机动中的架设和撤收时间。这两项性能对雷达的机动性十分重要。

9. **测量目标坐标或参数的数目**

目标坐标是指目标的方位、斜距和仰角(或高度)。目标的参数除目标的坐标参数以外，还指目标的速度和性质(机型、架数、敌我)。对于边扫描边跟踪雷达，还要对多批目标建立航迹，进行跟踪。此时，跟踪目标批数，航迹建立的正确率也是重要的战术参数。

雷达的主要技术参数如下。

1. **工作频率及工作带宽**

雷达的工作频率主要根据目标的特性、电波传播条件、天线尺寸、高频器件的性能、雷达的

需要全本请访问 www.ertongbook.com

测量精确度和功能等要求来决定。工作带宽主要根据抗干扰的要求来决定。一般要求工作带宽为5%～10%,超宽带雷达为25%以上。

2. 发射功率

发射功率的大小影响作用距离,功率大则作用距离大。发射功率分脉冲功率和平均功率。雷达在发射脉冲信号期间所输出的功率称脉冲功率,用 P_t 表示;平均功率是指一个重复周期 T_r 内发射机输出功率的平均值,用 P_{av} 表示。它们的关系为:

$$P_t \cdot \tau = P_{av} \cdot T_r \tag{1-2}$$

高频大功率的产生受到器件、电源容量和效率等因素限制。一般远程警戒雷达的脉冲功率为几百千瓦至兆瓦量级,中、近程火控雷达为几千瓦至几百千瓦量级。

3. 调制波形、脉冲宽度和重复频率

早期雷达发射信号采用单一的脉冲波形幅度调制,现代雷达则采用多种调制波形以供选择。

脉冲宽度指发射脉冲信号的持续时间,用 τ 表示。一般在 $0.05\mu s$～$20\mu s$ 之间,它不仅影响雷达探测能力,还影响距离分辨力。早期雷达的脉冲宽度是不变的,现代雷达常采用多种脉宽的信号以供选择。当采用脉冲压缩技术时,发射脉冲时宽可达数百微秒,相应地用脉冲压缩方式增大信号的带宽。

脉冲重复频率指雷达每秒钟发射的射频脉冲的个数,用 f_r 表示。脉冲重复频率的倒数叫脉冲重复周期,它等于相邻两个发射脉冲前沿的间隔时间,用 T_r 表示。雷达的脉冲重复频率 f_r 一般在 50Hz～2 000Hz 之间(相应的 T_r 为 20 000μs～500μs)。它们既决定了雷达单值测距范围,又影响不模糊测速区域大小。为了满足测距测速的性能要求,现代雷达常采用多种重复频率或参差重复频率。

4. 天线的波束形状、增益和扫描方式

天线波束形状一般用水平和垂直面内的波束宽度来表示。米波雷达的波束宽度在10度量级,而厘米波雷达的波束宽度在几度左右。图1.4(a)、(b)、(c)、(d)分别示出高增益天线方向图和常见的针状、扇形和余割平方形波束。

天线的增益近似表示式为

$$G = 4\pi A/\lambda^2$$

式中 A 为天线的有效截面积。天线的增益越大,则雷达作用距离越远。

搜索和跟踪目标时,天线的主瓣在雷达的探测空域内以一定的规律运动,称为扫描。它可分为机械扫描和电扫描两大类。按照扫描时波束在空间的运动规律,扫描方式大致可分为圆周扫描、圆锥扫描、扇形扫描、锯齿形扫描和螺旋扫描等。常规的两坐标警戒雷达一般采用机械方式的圆周扫描,炮瞄雷达在跟踪时可以采用圆锥扫描。相控阵雷达是电扫描的,波束指向由计算机决定,不要求阵列天线在空间做连续机械运动。有的雷达同时采用机械扫描和电扫描两种方式,例如有的三坐标雷达在方位上采用机械扫描,在仰角上采用电扫描。它还可以用相扫或相扫与频扫结合构成二维空间扫描。

5. 接收机的灵敏度

接收机的灵敏度是指雷达接收微弱信号的能力。它用接收机在噪声电平一定时所能感知的输入功率的大小来表示,通常规定在保证50%～90%发现概率条件下,接收机输入端回波信号的最小功率作为接收机的最小可检测信号功率 $P_{r,\min}$。这个功率越小,接收机的灵敏度越高,雷达的作用距离就越远。目前的雷达接收机灵敏度一般在 0.01pW～1pW 之间。

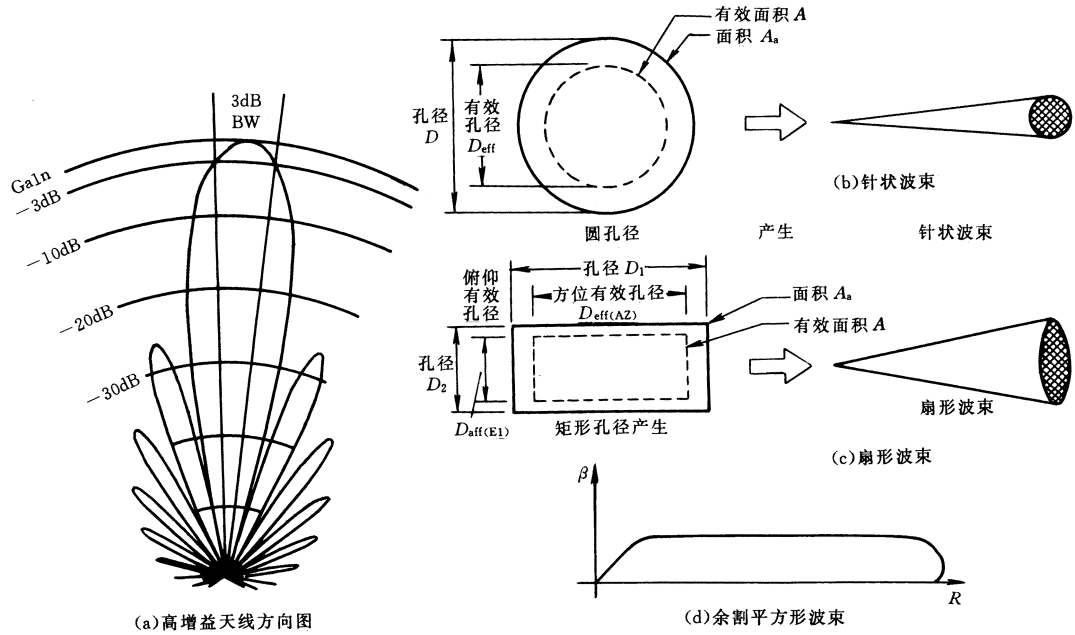


图 1.4　针状、扇形和余割平方形波束

6. **终端装置和雷达输出数据的形式**

最常用的终端装置是显示器。根据雷达的任务和性质不同，所采用的显示器形式也不同。例如，按坐标形式分，有极坐标形式的平面位置显示器；有直角坐标形式的距离—方位显示器、距离—高度显示器；或者是上述两种形式的变形。

带有计算机的雷达，显示器既是雷达的终端，又是计算机的终端，它既显示雷达接收机输出的原始信息，又显示计算机处理以后的各种数据。在半自动录取的雷达中，仍然依靠显示器来录取目标的坐标。在全自动录取的雷达中，显示器则是人工监视的主要工具。显示器和键盘的组合，常作为人与计算机对话的手段。

7. **电源供应**

功率大的雷达，电源供应是个重要的问题。特别是架设在野外无市电供应的地方，需要自己发电。电源的供应除了考虑功率容量外，还要考虑频率。地面雷达可以用 50Hz **交流电，船舶和飞机上的雷达，为了减轻重量，采用高频的交流电源，最常用的是** 400Hz。

1.2.2　雷达战术、技术性能与技术参数的关系

为了保证雷达的战术、技术性能得到满足，必须合理地选择雷达的基本技术参数。下面我们以波长、脉冲重复频率、脉冲宽度、天线方向图和功率增益系数、接收机通频带以及发射功率等技术参数的选择为例，来说明它们对雷达战术、技术性能的影响，从中可了解到选择技术参数时会遇到许多互相矛盾的要求。因此在设计时需要进行综合分析和权衡，合理地折衷解决。

1. **工作波长** λ **的选择**

(1) **从提高接收机灵敏度来看，必须考虑所选波长下的接收机内部噪声和大气噪声大小以及电磁波在大气中的衰减，希望波长选择得长一些。**

(2) **从提高距离分辨力，提高角度分辨力和提高天线增益的角度来看，希望波长选择得短**

一些。

大家知道，距离分辨力$(\Delta R)_{\min}$可用下式来表示：

$$(\Delta R)_{\min}=\frac{c\tau}{2} \tag{1-4}$$

式中，c 为电波传播速度；τ 为脉冲宽度。

然而，为了保证脉冲波形的完整，通常要求

$$\tau \geqslant QT_{hf} \tag{1-5}$$

$$T_{hf}=\frac{\lambda}{c} \tag{1-6}$$

式中，T_{hf}为高频振荡周期；Q 为高频振荡回路品质因数。

由式(1-4)～式(1-6)可见，λ 愈短，T_{hf}就越小，τ 亦可做得较窄，因而可提高距离分辨力。

至于角度分辨力，它与天线波束宽度 θ 有关，而 θ 由下式确定：

$$\theta=\eta_l\frac{\lambda}{D} \tag{1-7}$$

式中，η_l 为与天线口径场分布有关的系数；D 为天线口径宽度；λ 为工作波长。由式(1-7)可见，λ 愈短，则 θ 愈窄，角度分辨力就愈高。

另外，从提高天线增益 G 的角度来看

$$G=\frac{4\pi\eta_A A_a}{\lambda^2}=\frac{4\pi A}{\lambda^2} \tag{1-8}$$

式中，$A=\eta_A A_a$，η_A 为天线口径面积利用系数，A_a 为天线几何面积。显然在天线有效面积 A 一定的情况下，λ 愈短，G 就愈高。在 G 一定的情况下，λ 愈短，天线的尺寸愈小，便于架设撤收，机动性能好。

(3) 从雷达的用途来看，雷达的用途与波长有关，因为目标的散射性能与波长有关。而目标对电磁波的散射情况是：

当目标尺寸远大于波长时，目标对电磁波以散射为主，以绕射为辅，目标的有效散射面积大。

当目标尺寸远小于波长时，目标对电磁波以绕射为主，以散射为辅，目标的有效散射面积小。

因此，用于探测炮弹、潜艇的潜望塔等目标的雷达，用于测雨的气象雷达(以雨滴为目标)，其工作波长相对要短。从反隐身角度看，波长在两个极端即米波或毫米波较好。

(4) 从地面或水面的反射影响来看：水平极化的米波雷达，由于地面反射的影响，波瓣发生了分裂，雷达的探测距离在有些仰角上比自由空间增大；而在有些仰角上比自由空间减小，掌握目标情况可能出现不连续。地面反射对厘米波雷达的影响则较小。故中等作用距离的引导雷达，均采用厘米波段；作用距离较远的警戒雷达常采用分米波或米波波段。

(5) 从杂波干扰的影响来看：这里所说的杂波干扰，是指云、雨气象干扰和地物、海浪等回波干扰。云、雨、地物、海浪等的回波显示在荧光屏上，形成了对辨识目标回波的干扰。为了便于从杂波中辨识目标，显然是输入接收机的信杂比越大越好。在目标(飞机)与云、雨相混的情况下，由于目标(飞机)的尺寸远大于水滴的尺寸，依据目标的反射特性，显然采用大的 λ，可以提高输入信杂比；当目标(飞机)以地物(建筑物、山峦)为背景时，由于目标(飞机)的尺寸远小于地物的尺寸，依据目标的反射特性，显然采用小的 λ 较好，但是，实践证明，λ 太小将会出现相反的效果。所以，λ 的减小是有限度的。总之，工作波长的选择，应根据雷达的任务而定。

2. 脉冲重复频率的选择

(1) 我们知道,天线扫描引起的干扰背景起伏 $\left|\frac{\Delta U_a}{U_a}\right|$ 可表示为

$$\left|\frac{\Delta U_a}{U_a}\right|_{\max} = 1.43\frac{\Omega_a}{\theta_{0.5}f_r} = \frac{1.43}{n} \tag{1-9}$$

式中,Ω_a 为天线转速;n 为可积累的脉冲数。由上式可看出,在其他参数保持一定时,为了减小天线扫描引起的背景起伏,希望 f_r 选择得高一些。

对于动目标显示雷达,"盲速"v_{rbm} 可表示为

$$v_{rbm} = n\frac{\lambda f_r}{2} \qquad (n = 1,2,3\cdots) \tag{1-10}$$

由此可知,为使第一盲速超过被探测动目标的最大速度,亦希望 f_r 选择得高一些。

另外,固定目标内部运动引起的背景起伏可表示为

$$\sigma_f = K_g\frac{\sigma_{vn}}{\lambda f_r} \tag{1-11}$$

式中,K_g 为由地形特点和气象条件决定的系数;σ_{vn} 为干扰背景合成信号的均方值。所以,从减小 σ_f 来看,亦希望 f_r 选择得高一些。

(2) 为了保证测距的单值性,脉冲重复率又不能选择得太高。脉冲重复频率通常按下列关系式进行选择:

$$\left.\begin{aligned} f_{r,\max\mathrm{I}} &\leqslant \frac{c}{(2.4\sim 2.5)R_{\max\mathrm{I}}} \\ f_{r,\max\mathrm{II}} &\leqslant \frac{c}{(2.4\sim 2.5)R_{\max\mathrm{II}}} \end{aligned}\right\} \tag{1-12}$$

式中,$R_{\max\mathrm{I}}$ 为正常显示时的最大作用距离;$R_{\max\mathrm{II}}$ 为动目标显示时的最大作用距离;

$f_{r,\max\mathrm{I}}$ 为正常显示时最高脉冲重复频率;$f_{r,\max\mathrm{II}}$ 为动目标显示时最高脉冲重复频率。

有时按式(1-12)两种情况求出的脉冲重复频率是不一致的。这时我们应予折衷考虑。也可采用参差脉冲重复频率的方法。

(3) 在同样的发现概率的情况下,增加脉冲积累数可增大探测距离,而脉冲积累数可表示为

$$n = \frac{\theta_{0.5}}{\Omega_a}f_r \tag{1-13}$$

式中,$\theta_{0.5}$ 为半功率点波瓣宽度;Ω_a 为天线转速(度/秒)。可见,提高脉冲重复频率,可以增大雷达的最大探测距离。但是,脉冲重复频率的提高不是无限制的,通常应在保障最大无模糊距离大于最大探测距离的条件下来提高。

(4) 从发射管所允许的最大平均功率来看,发射管的平均功率越高,则其温度上升越快。为了保障发射管能够正常地工作,必须不超过其允许的最大平均功率。因为 $P_{av} = P_t \cdot \tau \cdot f_r$ 在脉冲功率和脉冲宽度已定的情况下,平均功率随脉冲重复频率的上升而上升。当最大平均功率被限定后,就必须限定最高脉冲重复频率。

在实际工作中,最高脉冲重复频率为

$$f_{r,\max} = \frac{P_{av,\max}}{P_t \cdot \tau} \tag{1-14}$$

3. 脉冲宽度的选择

对于脉冲宽度的选择,也应全面考虑。例如脉冲宽度愈窄,则对稳定性的要求将愈高;另

外对于非脉冲压缩雷达而言，为了提高接收机的灵敏度，希望脉冲宽度选择得宽一些。因为要使接收机得到最佳的性能，则要求接收机通频带 B 为脉冲宽度 τ 的倒数，即 $B=\frac{1}{\tau}$。而接收机灵敏度与 B 是成反比的，所以接收机灵敏度与脉冲宽度是成正比的。这样一来，在其他参数不变的情况下，要提高接收机灵敏度则要增大脉冲宽度。

在雷达脉冲重复频率和脉冲功率不变的情况下，为了提高发射机平均功率（不超过允许值）来增加雷达作用距离，亦希望选用较宽的脉冲。但是，为了减小杂波干扰强度，提高雷达抗杂波干扰能力，则希望脉冲宽度选择得窄一些。同时，为了提高雷达距离分辨力，亦希望脉冲宽度选择得窄一些。

从雷达距离分辨力和最小作用距离的观点出发，脉冲宽度可按下列表达式选择：

$$\left.\begin{aligned}\tau &\leqslant \frac{2\Delta R_{\min}}{c}\\ \tau &= \frac{2R_{\min}}{c}-t_r'\end{aligned}\right\} \tag{1-15}$$

式中，$\Delta R_{\min}$ 为雷达距离分辨力；$R_{\min}$ 为所要求的最小作用距离；t_r' 为收发开关恢复时间，通常 $t_r'=1\mu s\sim 2\mu s$。

4. 天线的方向图和功率增益系数的选择

天线方向图可从水平波束、垂直波束宽度和旁瓣电平几方面来考虑。

（1）水平波束的选择：以地面对空搜索雷达为例，它通常采用最大值法来测定目标方位角。为了提高方位角分辨力和减少测角误差，提高天线增益，减小干扰强度，希望水平波束选择得窄一些。但为了提高目标发现概率，要求天线每扫描一周能接收到足够多的回波脉冲数（一般要求远大于 10），则希望水平波束选择得宽一些。

当天线扫描速度保持一定时，为了减小天线扫描所引起的干扰背景起伏和减小天线尺寸，也希望采用较宽的水平波束。以地面对空搜索雷达为例，其水平波束宽度大约为 1°左右。

在良好的信号分辨力情况下，测向的方位均方误差约为

$$\sigma_\alpha = (0.15\sim 0.25)\theta_\alpha \tag{1-16}$$

式中，θ_α 为天线水平波束宽度。由此可得到水平波束宽度为

$$\theta_\alpha = \frac{\sigma_\alpha}{0.15\sim 0.25} \tag{1-17}$$

当 θ_α 大于显示器亮点直径 d_0 时，最大值测向时的方位分辨力 $\Delta\alpha$ 近似等于水平波束宽度 θ_α，即

$$\Delta\alpha \approx \theta_\alpha \tag{1-18}$$

通常 σ_α 和 $\Delta\alpha$ 都是给定的，所以，θ_α 可按式(1-17)和式(1-18)来计算。如果按式(1-17)所计算出来的 $\theta_\alpha>\Delta\alpha$，则应通过信号处理等途径来解决。为了使方位分辨力具有一定的余量，通常 θ_α 应取得略小于 $\Delta\alpha$。

（2）垂直波束的选择：为了最有效地利用雷达发射功率，对于飞行高度为 h 的动目标，只要它位于雷达威力范围内，不论其距离远近由该目标所反射回来的回波功率最好保持恒定。而当目标在最大高度 $h_{\max}$ 上飞行时，其回波功率也不应小于接收机所必须的最小接收功率 $P_{r,\min}$。以地面对空搜索雷达为例，为了满足上述要求，常采用余割平方垂直波束。

因此对于地面搜索雷达，垂直波束宽度 θ_β 可按下式计算：

$$\theta_\beta = \beta_{\max}-\beta_{\min} \tag{1-19}$$

式中，β_{max}为余割平方天线波束的最大仰角；β_{min}为余割平方天线波束最小仰角。

通常β_{max}按下式计算：

$$\sin\beta_{max} = \frac{h'}{r'} \tag{1-20}$$

式中，r'为确保使防空系统有足够的准备时间，雷达所必须的作用距离；h'为与r'相对应的目标离地面的高度。

β_{min}为波束在地平线上最低的仰角，它由最远而且最低的动目标在空间的位置来确定。由于β_{min}一般很小，因此，β_{min}可按下式近似计算：

$$\beta_{min} \approx \frac{h_1}{R_{max}} \tag{1-21}$$

式中，h_1为在雷达最大作用距离处的空间目标离地平线的高度；R_{max}为雷达最大作用距离。考虑到地球的曲率，则有

$$\beta_{min} \approx \frac{h_2}{R_{max}} - \frac{R_{max}}{2R_e} \tag{1-22}$$

式中，h_2为最大作用距离处的空间动目标离地表面的高度；R_e为在标准大气折射下，地球等效半径，近似值为 8500 km。有时按式(1-22)算出的β_{min}很小，须采用架高天线。

为了减小固定目标干扰强度，垂直波束下边缘应尽量地陡。

(3) 天线旁瓣电平应选择得足够低，因为旁瓣电平太高，会使雷达受到严重的有源和/或杂波干扰，同时也会造成能量的分散。但天线实现低旁瓣有一定技术困难，所以应根据实际要求予以折衷考虑。一般而言，第一旁瓣电平与主瓣电平之比应小于－20dB 以上，对于低旁瓣天线，则要求做到小于－30dB 或－35dB 以上。

(4) 波瓣图的形状，应根据雷达的战术用途来选择。精密跟踪雷达，选择θ_β、θ_α均小的针状波束；测高雷达选择θ_β小，θ_α大的扇形波束；搜索雷达常采用余割平方波束。

(5) 天线功率增益系数可按下式确定：

$$G = \eta_k G_D \tag{1-23}$$

式中，η_k为辐射效率，一般可取为 0.6 左右；G_D为天线方向性系数，它可按下式确定：

$$G_D = \frac{4\pi}{\theta_\alpha \theta_\beta} \tag{1-24}$$

式中，θ_β为垂直波束宽度；θ_α为水平波束宽度。

5. 接收机噪声系数和通频带的确定

雷达接收机接收微弱信号的能力，通常用最小门限信号功率来描述。最小门限信号功率(即接收机门限灵敏度)可按下式计算：

$$P_{r,min} = kT_0 F_n BM \tag{1-25}$$

式中，$k = 1.38 \times 10^{-23}$ W·s/度；$T_0 = 290°$K；F_n为接收机噪声系数；B为接收机通频带；M为识别系数。

为了求$P_{r,min}$，则必须先求出F_n，B和M。下面我们仅介绍F_n和B的一般计算方法，识别系数M与接收机中的中频、视频带宽有关，还与脉冲积累、天线波束、显示器等有关，在此不作论述。

(1) 接收机噪声系数的确定，例如，对于图 1.5 所示的接收机框图，在中频增益较高时，总的噪声系数可近似表示为

$$F_n = F_1 + (F_2 - 1)/G_1 + (F_3 - 1)/G_1 G_2 + \cdots \tag{1-26}$$

需要全本请访问 www.ertongbook.com