

雷达工程学

李蕴滋 黄培康 编著
郝祖全 林平草 蔡忠宇



海洋出版社

前 言

本世纪 30 年代, 雷达问世。60 多年以来, 雷达有了很大的发展, 它在国防建设和国民经济建设中都具有重要的作用。国土预警、导弹制导、飞机导航和炮火瞄准等都用到军事雷达; 深空探测、空间站交会、微波遥感、气象预报和地球资源探勘等都用到民用雷达。由于雷达探测的目标不同和用途各异, 雷达在体制和工程实现上也就差别很大, 因此, “雷达工程学”既是一门专业课程, 又是一项较为通用的基础应用专业。鉴于当前国内各高等学校已不再设置雷达课程, 因此针对大批大学本科和硕士、博士毕业生刚参加该领域工作时的需要, 我们编著了这本《雷达工程学》。

雷达工程学的内容十分丰富, 但在一本书中包罗万象是不现实的。本书具有如下几个特点: 强调系统性。在结构上力求有一个明晰的系统框架, 雷达总体的层次清楚, 在阐述上突出雷达体制与系统设计方法; 侧重制导跟踪雷达。编著者在该工程领域工作几十年, 因此力图将我们的经验与教训进行总结、归纳、融贯在本书内容中; 理论结合实践, 注重实用性。尽量多提供有用的经验公式、曲线及图表, 以提高本书的实用价值。

本书由李蕴滋研究员写成初稿。在初稿基础上, 由中国航天工业总公司第二研究院科学技术委员会组织编写, 并由如下同志执笔对初稿作了较大的修改, 全书改写成十章。第一、四章由黄培康研究员执笔, 第二、三、十章由郝祖全研究员执笔, 第五、六章由林平革研究员执笔, 第七、八、九章由秦忠宇研究员执笔, 全书由黄培康研究员统稿和最后审定。

本书的出版得到了中国航天工业总公司第二研究院领导的大力支持和资助。在编写过程中, 第二研究院领导王可立同志给予了热心的帮助与指导; 科技委吕慧英高级工程师从编写到出版做了大量的业务工作; 唐纹瑛研究员为出版尽心尽力。这里一并表示衷心的感谢。

限于编著者的水平, 书中不当之处和错误在所难免, 恳望读者不吝指正。

编著者

1998 年 12 月于北京

目 次

第一章 概 论

1.1 引言	(1)
1.2 雷达的基本组成	(2)
1.3 雷达主要功能与现代雷达技术	(3)
1.3.1 检测功能	(3)
1.3.2 测距功能	(4)
1.3.3 测速功能	(5)
1.3.4 测角功能	(5)
1.3.5 识别功能	(6)
1.3.6 现代雷达技术	(7)
1.4 雷达使用频段	(8)
1.5 雷达发展史	(9)
1.6 防空导弹制导体制	(12)
1.6.1 指令制导	(13)
1.6.2 寻的末制导	(13)
1.6.3 复合制导	(15)
1.7 防空导弹地面制导雷达	(15)
1.8 制导雷达总体设计经验点滴	(16)

第二章 雷达信号检测和距离方程

2.1 引言	(19)
2.2 目标回波和噪声的统计特性	(22)
2.2.1 目标回波起伏模型	(22)
2.2.2 噪声统计模型	(28)
2.3 信号的单次检测和积累检测	(33)
2.3.1 信号检测的基本概念	(33)
2.3.2 虚警概率的估算	(36)
2.3.3 单次检测	(38)
2.3.4 积累检测	(39)
2.4 各种损耗因子对信号传输的影响	(43)
2.4.1 发射损耗系数	(43)
2.4.2 接收损耗系数	(44)
2.4.3 大气吸收损耗	(44)

2.4.4	火焰衰减损耗	(45)
2.4.5	极化损耗	(46)
2.4.6	起伏损耗	(46)
2.4.7	噪声折叠损失	(46)
2.4.8	其他的损耗因子	(47)
2.5	雷达距离方程的几种表达形式	(48)
2.5.1	用信号功率表示雷达方程	(48)
2.5.2	用信号能量表示雷达方程	(49)
2.5.3	搜索雷达方程	(49)
2.5.4	跟踪雷达方程	(50)
2.5.5	干扰情况下雷达方程	(50)
2.5.6	扩展目标雷达方程	(51)

第三章 电波传播与杂波环境

3.1	雷达波的传播、反射与散射	(54)
3.2	地球曲率与大气特性对电波传播的影响	(55)
3.2.1	平地面传播	(55)
3.2.2	球地面传播与大气折射	(57)
3.2.3	大气衰减与散射	(59)
3.2.4	超折射非正常传播	(61)
3.2.5	环境噪声	(62)
3.3	扩展目标、环境及传播特性	(64)
3.3.1	扩展目标雷达探测特点	(64)
3.3.2	散射场的相干性与非相干性	(65)
3.3.3	粗糙度	(66)
3.3.4	扩展目标的雷达散射截面	(68)
3.4	陆地、海面对雷达波的反射与散射	(70)
3.4.1	海态、风速对海面散射的影响	(70)
3.4.2	入射余角、极化对散射系数的影响	(73)
3.4.3	工作波长对散射系数的影响	(74)
3.4.4	陆地回波起伏特性	(75)
3.4.5	海面回波起伏特性	(77)

第四章 电子战中的雷达对抗技术

4.1	防空导弹的电子对抗史	(79)
4.2	制导雷达面临的四大威胁	(81)

4.2.1 综合性电子干扰威胁	(81)
4.2.2 反辐射导弹威胁	(83)
4.2.3 低空和超低空突防	(83)
4.2.4 雷达目标隐身技术威胁	(83)
4.3 指示雷达与跟踪雷达的抗干扰技术	(84)
4.4 抗反辐射导弹技术	(85)
4.4.1 低截获概率 (LPI) 技术	(85)
4.4.2 诱偏技术	(86)
4.4.3 双 (多) 基地和雷达组网技术	(87)
4.4.4 制导雷达波段的选择	(87)
4.4.5 光电探测与辅助跟踪装置	(88)
4.5 低空探测与低空跟踪	(88)
4.6 雷达反隐身技术	(91)

第五章 雷达体制

5.1 雷达体制的分类	(93)
5.1.1 按雷达的用途分类	(93)
5.1.2 按雷达信号的形式分类	(94)
5.1.3 按角跟踪的方式分类	(94)
5.1.4 按天线扫描方式分类	(95)
5.1.5 按测量目标的参数分类	(95)
5.1.6 按雷达采用的信号处理方式分类	(96)
5.1.7 按雷达使用的频段分类	(96)
5.2 单脉冲跟踪雷达	(97)
5.2.1 单脉冲雷达的工作原理及系统组成	(97)
5.2.2 单脉冲雷达的测角精度	(101)
5.3 多功能相控阵雷达	(106)
5.3.1 相控阵雷达的特点	(106)
5.3.2 相控阵雷达系统组成	(107)
5.3.3 相控阵雷达天线和波束控制	(109)
5.3.4 相控阵雷达的工作方式	(118)
5.3.5 固态有源相控阵雷达	(120)
5.4 脉冲多普勒雷达	(122)
5.4.1 脉冲多普勒雷达的特点及主要性能指标	(122)
5.4.2 脉冲多普勒雷达的信号处理方法	(126)
5.4.3 对目标速度的搜索与跟踪	(127)
5.4.4 对目标距离的搜索与跟踪	(131)
5.5 逆合成孔径雷达	(133)

5.5.1 逆合成孔径雷达的两维高分辨机理	(133)
5.5.2 逆合成孔径雷达的成像算法	(135)
5.5.3 逆合成孔径雷达运动补偿	(140)
5.5.4 逆合成孔径雷达举例	(144)

第六章 雷达信号波形设计

6.1 信号波形设计的依据	(147)
6.2 信号频谱及匹配滤波	(148)
6.2.1 信号频谱	(148)
6.2.2 匹配滤波	(149)
6.2.3 典型雷达信号的频谱与匹配滤波	(151)
6.3 模糊函数及其特性	(155)
6.3.1 模糊函数定义	(155)
6.3.2 模糊函数的性质	(156)
6.3.3 模糊函数的类型	(157)
6.3.4 典型雷达信号的模糊函数	(158)
6.4 潜在精度、分辨力、抗干扰性与信号波形的关系	(167)
6.4.1 潜在精度	(167)
6.4.2 分辨力	(169)
6.4.3 抗干扰(杂波抑制)能力	(171)
6.5 雷达信号的产生及匹配滤波处理	(171)
6.5.1 数字匹配滤波处理	(171)
6.5.2 数字波形产生	(176)
6.5.3 典型雷达信号波形产生和匹配滤波的有关问题	(176)
6.6 信号波形的设计与综合	(179)

第七章 搜索指示雷达

7.1 引言	(183)
7.2 搜索指示雷达设计准则	(184)
7.3 搜索指示雷达时域信号处理	(186)
7.3.1 动目标显示(MTI)滤波器	(187)
7.3.2 动目标检测(MTD)滤波器	(190)
7.3.3 恒虚警处理	(192)
7.3.4 零速滤波器和杂波图	(193)
7.3.5 正交双通道滤波器	(193)
7.4 二坐标(2D)雷达信号提取	(199)

7.4.1 雷达覆盖图	(199)
7.4.2 天线口径尺寸	(200)
7.4.3 方位和距离量测值的提取	(200)
7.5 三坐标 (3D) 雷达信号提取	(202)
7.5.1 仰角量测值的提取	(202)
7.5.2 方位量测值的提取	(203)

第八章 跟踪制导雷达

8.1 引言	(205)
8.2 跟踪制导雷达设计准则	(205)
8.3 单脉冲测角原理	(206)
8.3.1 振幅和差比较单脉冲测角	(206)
8.3.2 相位和差比较单脉冲测角	(207)
8.3.3 角误差的提取	(208)
8.4 距离误差的提取	(212)
8.5 时空域滤波在跟踪制导雷达中的应用	(215)
8.6 目标与导弹相对坐标的测量	(217)
8.7 细谱线跟踪在跟踪制导雷达中的应用	(218)
8.7.1 窄带滤波提高信噪比	(219)
8.7.2 细谱线跟踪抑制杂波	(219)
8.7.3 误差信号提取	(220)
8.7.4 目标截获和速度指定	(221)

第九章 相控阵雷达的分析与设计

9.1 引言	(224)
9.2 相控阵雷达的参数制约关系	(225)
9.3 天线单元间距的选择	(227)
9.4 相控阵天线的最小跳跃角和相位基准点	(229)
9.5 数字波束形成 (DBF) 技术	(232)
9.5.1 DBF 技术用于超分辨	(232)
9.5.2 单脉冲状态下 DBF 技术的应用	(236)
9.5.3 相控阵雷达自适应旁瓣对消	(238)
9.5.4 馈源数与对消干扰源数量的关系	(243)
9.6 通道间的幅相校正	(245)
9.7 I 、 Q 不正交的校正方法	(246)
9.8 不同扫描角时的单脉冲角误差信号	(248)

9.9 移相器引起的测角误差	(250)
9.10 宽角扫描和信号带宽之间的关系	(252)

第十章 雷达发展趋势及应用新领域

10.1 雷达技术发展趋势	(254)
10.1.1 基础技术发展趋势	(254)
10.1.2 应用领域发展趋势	(258)
10.2 微波遥感及成像雷达	(261)
10.2.1 微波遥感概述	(261)
10.2.2 合成孔径雷达	(263)
10.2.3 逆合成孔径雷达	(267)
10.2.4 雷达高度计	(268)
10.2.5 雷达散射计	(269)
10.2.6 雷达辐射计	(271)
10.3 精确寻的末制导导引头	(273)
10.3.1 精确制导概述	(273)
10.3.2 脉冲多普勒主动导引头	(276)
10.3.3 宽带毫米波主动导引头	(278)
10.3.4 反辐射宽带被动导引头	(281)
10.3.5 地图匹配末制导导引头	(285)
10.4 光电雷达	(286)
10.4.1 红外测量雷达	(286)
10.4.2 红外被动寻的导引头	(287)

第一章 概 论

1.1 引 言

雷达起源 雷达是在 20 世纪 30 到 40 年代出现的一种新兴的无线电电子测量系统。当时正处在第二次世界大战的前夕，各国针对当时飞机轰炸的空袭威胁，综合利用了 20 世纪初期业已发现的电波传播与物体反射电磁波的现象，以及利用等幅波和脉冲波作电离层测高的技术成果而发展起来的。雷达是英文“RADAR”的译音。它是“Radio Detection and Ranging”的缩写，就是用无线电技术发现目标，进行检测和测量其距离的设备。目前，全世界仍用这个英文译音作为这种设备的名称。雷达之所以能够具有检测目标的能力，正像电离层垂直观测一样，从地面上发射一电磁波，经电离层反射后，在地面上的接收机就能测出高空电离层的存在，并按电波传播速度算出电离层高度。雷达也是向空中目标发射电磁波，经空中目标散射后，能回到原处并接收到散射的回波，检测出目标的存在，并测量出它的距离和位置。半个世纪以来，随着雷达技术发展，雷达的含义已由最初的“无线电检测与测距”扩展为“雷达是对目标进行检测与定位的电磁设备”（国际电子与电气工程师协会（IEEE）定义）。现代雷达的任务不仅检测目标的存在和位置，还要测出目标的速度、目标的轨道，还要回答是什么样的目标以及目标的姿态等等，因此现代雷达较为确切的定义可以这样说：雷达是对远距离目标进行“无线电探测、定位、测轨和识别”的一种工具。

飞机、导弹、人造卫星、飞船、舰船、车辆、兵器、炮弹、云雨等运动目标以及桥梁、建筑物、山川、森林、农田、海洋等固定目标都可以作为雷达的探测目标。因此，雷达已广泛应用于地面、海面、飞机、导弹、卫星与飞船等军用和民用领域。

发展初期 二次大战初期，英国首先使用雷达预报和防御空袭。在大战期间，各交战国都在研制这种设备。战后，雷达在军事上和民用上，针对航空、航海、航天、导航、气候预报和空中交通管制等各方面，都先后加速发展。在 50 年代，常规雷达技术取得了飞快的发展。60 年代又出现了用电子技术快速扫描波束，研制成功大空域扫描探测多目标能力的相控阵雷达体制。这使雷达向多功能、多用途、多目标的方向发展。由于电子计算机的问世，把雷达的运转控制、波束扫描、监测维护和自适应功能等推向更高的水平。

现代雷达 70 年代以来，由于半导体、集成电路、以及计算技术的发展，使雷达技术更为先进。到 80 年代，由于超大规模集成电路、超高速集成电路、单片微波集成电路、以及光纤数据传输、红外、激光技术的快速发展，使现代雷达技术再次获得突飞猛进的发展。过去人类借助于光学系统测遥远的目标，当今还能借助于雷达——这个电子望远镜，把视力从几十米延伸到几百公里，乃至几千公里的范围。雷达是人类全天候的视力倍增器。它不怕云、雾、雷、雨的影响，日夜都能工作。大多数雷达（超视距雷达除外）同人

的眼睛一样,只能看到视线范围内的目标,也就是说雷达传播不能走曲线,不能绕过前面的障碍,“看”到被地球曲率所挡住的遥远目标。到目前为止,雷达基本上还不能直接看到目标的真实形状、物质组成、目标不同结构和颜色。目前已有了测散射中心的成像雷达,因此雷达技术将会有更大的发展,会对人类有更大的贡献。

四大威胁 由于雷达在军事上能提前检测出目标,能利用导弹攻击目标,能控制武器更准确地摧毁目标,起到了其他武器不可替代的作用。这就使得各种对抗雷达的新技术,也在不断地发展。其中反辐射导弹,它是专门利用雷达所辐射的电磁波束导向雷达站的导弹并能击毁雷达,这是一种“硬”杀伤武器。为了减少雷达的作用距离,用吸波材料或采用特殊的结构外形,把目标散射雷达电磁波的雷达散射截面(RCS)下降几个数量级的水平,使之不能提前发现目标。由于低空对雷达的遮挡作用,敌方目标采用低空或超低空偷袭,使雷达的发现距离锐减。敌方还会使用各种电子干扰技术,主动的和被动的,利用它们形成对电磁波的干扰环境,使雷达不能检测出目标或无法工作。以上提到的反辐射导弹、隐身、低空与电磁干扰是雷达的四大威胁,都将使雷达有效检测目标的能力大为降低或全部丧失。因此,未来的军用雷达,只能在克服上述各种被袭击或被干扰的环境下,提高雷达本身的抗干扰、抗杀伤的作战能力。这是军用雷达必须解决的技术关键。

本章使用简洁、明了的笔法,使读者通过阅读本章就能了解雷达的功能,检测目标的方法,如何测量目标的位置,雷达使用了哪些频段以及现代雷达的一些新技术,还介绍了雷达的发展过程。这些概念都是用最简单的说理,不求深入但很实际,使人们对雷达从一开始就有个比较全面的了解。由于要对雷达有个全面介绍,在叙述中就会遇到较多的专用名词,这里只要求读者对这些名词和专用词先承认它们,记住一些,无疑这些词在本书后面都会经常出现,并会做深入详细的解说。因此,事先把这些重要词反复记忆,反复解说,相信这样做是会起到由浅入深的作用的。

1.2 雷达的基本组成

雷达具有多种体制,各种体制的雷达其组成部分也各不相同。但是,不论何种体制,其基本组成部分都是一样的,图1-1描绘了雷达基本组成方框图。

图1-1所示的雷达采用了功率放大发射机与超外差接收系统,这是现代雷达所常用的。天线是收发共用的,因此称为单基地雷达。收发开关用于将发射系统和接收系统共同与天线连接起来,用时分的方法轮流地将天线接到发射系统或接收系统。发射系统包括波形产生器和功率放大器两部分,一部雷达可以有多种发射波形,以得到不同的分辨力和抗干扰性能。雷达发射经天线形成辐射电磁波,它与目标相互作用后形成散射回波,其中一部分被雷达天线接收,经收发转换开关、低噪声放大后进入混频单元,回波与本振信号混频后产生中频信号,如果本振信号与发射信号是相关的,则中频回波中还保留了回波的相位信息,这对目标识别是非常有用的信息。中频放大系统中一般包含了匹配滤波器的功能,它要使雷达输出的信号噪声比(S/N)最大,这对弱信号检测、跟踪与识别都是非常有用的。二次检波是一种包络检波,从中取得幅度调制信息,在多普勒体制雷达中二次检波被相位检波器代替,它具有多普勒频率的检测功能。经过视频放大的信号可带多个终

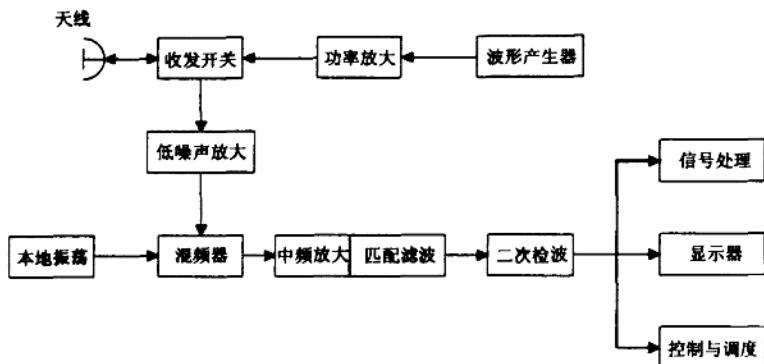


图 1-1 雷达基本组成方框图

端，显示器是人机交换信息的工具，雷达操作员凭显示器上的信息人工地操纵与指挥雷达动作。信息处理基本功能是抑制不需要信号与干扰，检测出目标有用信息，包括运动参数、轨迹与目标特征等，还可以根据雷达所处的地物环境与人为的干扰环境自适应地改变雷达波形参数和先进的信号处理。雷达控制单元能对雷达搜索、跟踪与制导等不同阶段进行资源调度，对多目标进行分配，达到对雷达资源的最佳利用。

1.3 雷达主要功能与现代雷达技术

雷达功能随用途不同而有差异，但其基本的主要功能应该是一样的。我们归纳雷达的主要功能是检测功能、测距功能、测速功能、测角功能和识别功能等，现分别阐述如下。

1.3.1 检测功能

为了把概念讲得更清楚，试图从能量观点通过雷达方程式来解释雷达检测目标的功能。

由雷达方程式推导出的雷达接收功率的表达式为

$$P_r = \frac{P_t G_t}{L_t} \frac{1}{4\pi R_t^2 L_{mt}} \sigma \frac{1}{4\pi R_r^2 L_{mr}} \frac{G_r \lambda_0^2}{4\pi L_r} \quad (1-1)$$

式中 P_r ——接收机输入端功率 (W)；

P_t ——发射机功率 (W)；

G_r, G_t ——分别为接收天线与发射天线的增益；

L_t, L_{mt} ——分别为发射机内馈线与发射天线到目标传输途径的损耗；

L_r, L_{mr} ——分别为接收机内馈线与目标到接收天线传输途径的损耗；

σ ——目标散射截面 (m^2)；

R_t, R_r ——分别为发射天线到目标与目标到接收天线的距离 (m)，当单站 (收、发同一地点) 时， $R_t = R_r$ ；

λ_0 ——雷达工作波长。

对式 (1-1) 等号右边各项的物理概念作如下解释：第一项为雷达向目标方向发射的功率，第一、二项乘积为目标处雷达照射功率密度 (W/m^2)，第一、二、三项乘积除以 4π 为目标各向同性散射功率密度 (W/sr)；右边最后一项即为接收天线的有效面积 (m^2)，它除以 R^2 后即接收天线有效口径向目标方向所张的立体角，因此很自然地得出最后各项乘积为雷达接收机输入功率 (W)。

通常接收目标的回波中总是混杂着各类噪声和干扰，雷达检测的任务就是最大程度地抑制噪声与干扰，同时最小程度地损失有用回波。在忽略机外干扰情况下，等效于接收机输入端的噪声功率为

$$P_N = kT_0BF_n \quad (1-2)$$

式中 P_N ——等效噪声功率 (W)；

$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ，玻耳兹曼常数；

B ——接收机频带宽度 (Hz)；

F_n ——接收机噪声系数。

雷达接收功率与接收机输入端等效噪声功率之比称为信号噪声比

$$\frac{S}{N} = \frac{P_r}{P_N} \quad (1-3)$$

雷达检测的任务就是获得最大信噪比。一般分两部分来解决：第一步应用最佳滤波理论，以输出信噪比最大为准则进行信号处理，这种滤波器称为匹配滤波器；第二步用最佳统计判决准则判断有无目标的存在，通常最佳检测系统由一个似然比计算装置与一个门限检测器组成，不同噪声性质的门限值均不同，雷达信号处理就是在同噪声与干扰的斗争中不断发展的。

1.3.2 测距功能

雷达的测距功能是通过测量目标散射回波相对于发射信号的时延来决定的。电磁波传播的速度与光速一样，当单站工作时，目标距离为

$$R = \frac{c}{2} \cdot \tau \quad (1-4)$$

式中 R ——目标距离 (m)；

c ——光速 ($3 \times 10^8 \text{m/s}$)；

τ ——雷达测得的时延 (s)。

雷达测距的精度决定于雷达发射波形的频带宽度、波形形状和接收输出端信噪比，而与波形的宽度与持续时间无关。测距误差可表达为

$$\sigma_R = \frac{c}{2} \cdot \frac{1}{\beta \sqrt{S/N}} \quad (1-5)$$

式中 σ_R ——雷达测距误差 (m)；

$\beta = 2\pi \left(\int_{-\infty}^{\infty} f^2 |u(f)|^2 df \right)^{1/2}$ ，归一化均方根频宽；

$u(f)$ ——雷达波形函数复值 $u(t)$ 的频谱；

S/N ——功率信噪比。

雷达设计者选择不同波形（如线性调频波、高斯波形、相干脉冲串波等）以期得到

大的 β 值。上式 σ_R 值有时也称为潜在测距精度值，因为雷达在具体实现测距方法时，只能非常接近这个值，而不能超过这个值。

雷达具体实现测距的方法很多，常用的是双波门测距法，还有最大似然估计法、计数法等，这里就不多赘述了。

1.3.3 测速功能

雷达在探测运动目标时，其回波信号频率要产生多普勒偏移，其偏移量大小随目标相对于雷达站的径向速度而不同，测量多普勒频移就是相应地测出目标的径向速度，因此雷达的测速功能就转化为雷达的测多普勒频率的功能。这时，测得的目标径向速度

$$v_T = \frac{\lambda}{2} f_d \quad (1-6)$$

式中 v_T ——目标径向速度 (m/s);

f_d ——目标回波多普勒频率 (Hz)。

雷达测速的精度决定于雷达发射波形在时域上的延伸程度和接收输出端的信噪比，而与波形的频带宽度无关。测速误差可表达为

$$\sigma_v = \frac{\lambda}{2} \frac{1}{\alpha \sqrt{S/N}} \quad (1-7)$$

式中 σ_v ——雷达测量目标径向速度的误差 (m/s);

$$\alpha = \left[\frac{(2\pi)^2 \int_{-\infty}^{\infty} t^2 |u(t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |u(t)|^2 dt} \right]^{\frac{1}{2}}, \text{ 归一化均方根时宽};$$

其中 $u(t)$ ——雷达波形函数的复值;

S/N ——功率信噪比。

雷达设计者进行各种波形设计以期得到大的 α 值， α 值称之为归一化均方根时宽值。上式 σ_v 值有时也称为潜在测速精度值，因为雷达在具体实现测速方法时，也只能非常接近这个值，而不能超过该值。

雷达具体实现测速的方法也很多，常用的有多个多普勒滤波器组、窄带细谱线跟踪器以及数字滤波器等，这里也不多细述了。

值得一提的是，实际设计雷达波形时，往往同时要求对目标的距离与速度进行精确估值，即产生时延与频移联合估值问题。式 (1-5) 与式 (1-7) 中的 β 与 α 值是均由雷达波形决定的参数，其中 β 由波形的频谱决定， α 由信号的持续时间决定，而信号的持续时间与频谱之间又有傅里叶变换关系，在具体设计波形时还会碰到时延估值与频移估值之间的耦合问题。雷达波形设计者必须牢固地树立这些理论概念，力求增大有效时宽频宽积，以提高联合测量精度。

1.3.4 测角功能

雷达测定目标角位置的方法是测量回波信号等相位波前的法线方向。通常利用天线波束的振幅方向图来鉴别入射角与天线轴线的相对角度。当入射角与天线轴线一致时，接收信号最强，偏离轴线时，信号减弱，因此寻求来波等相位波前法线的问题转化为天线的电压方向图函数 $F(\theta)$ ， $F(\theta)$ 主瓣愈窄测角精度愈高。类似于波形与其频谱之间关系，天线方向图函数 $F(\theta)$ 与其天线口面场分布 $A(X)$ 也是相应的傅里叶变换对关系。测角误差可

表达为

$$\sigma_{\theta} = \frac{1}{\gamma\left(\frac{D}{\lambda}\right)\sqrt{S/N}} \quad (1-8)$$

式中 σ_{θ} ——雷达测角误差 (rad)。

$$\gamma\left(\frac{D}{\lambda}\right) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{\int_{-\infty}^{\infty} x^2 |A(x)|^2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty} |A(x)|^2 dx} \right]^{\frac{1}{2}}, \text{ 归一化均方根孔径宽度;}$$

S/N ——功率信噪比。

因此雷达测角误差除与信号功率信噪比有关外, 主要决定于天线归一化口径 $\left(\frac{D}{\lambda}\right)$ 大小与口面场的分布。当口面场为等幅分布时

$$\gamma = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \left(\frac{D}{\lambda} \right) \quad (1-9)$$

当口面场为余弦分布时

$$\gamma \approx \sqrt{1.28} \left(\frac{D}{\lambda} \right) \quad (1-10)$$

因此雷达设计者力求在同样天线口径条件下保持口面场的等幅均匀性。

在极坐标系中, 雷达测角功能在两维展开, 即测量目标的方位角与俯仰角, 因此天线口面场也应在方位与俯仰两维上求其分布函数。

1.3.5 识别功能

现代雷达不但能回答目标在哪里与如何运动, 人们还要求雷达能告诉是个什么样的目标, 包括目标的大小、形状、姿态、表面材料的电磁参数和表面粗糙度等物理量, 这些通称为雷达识别功能。

雷达识别功能主要决定于雷达分辨力提高与目标特征信号提取。从理论观点讲, 目标散射子分布函数的位置矢量可以通过三维傅氏空间的散射场的波矢量来重构, 当在全部谱域照射目标和全部空间观测目标时, 可得到目标三维的无限小分辨力。这就启发人们应力求增大雷达瞬时频带宽度与多站观察来提高雷达分辨能力, 从而提高雷达识别功能。还应利用电磁波的极化性能来丰富目标特征信号。原则上, 任何一个雷达目标识别系统均可模块化为图 1-2 所示。

它由敏感器变换、特征信号提取、特征空间变换、目标分类器、样本存储和样本学习等模块组成。目标空间包含了目标本身以及包含所有表征目标的物理参数 (例如形状、体积、质量、表面材料的电磁参数与粗糙度、姿态以及运动学参数等)。如果用雷达能直接得到这些参数, 那么真、假目标的辨认与识别就变得十分容易。遗憾的是, 对于飞机、导弹与其他高速飞行器的探测只能靠遥感的雷达、红外与激光等传感器来完成, 而由雷达等测得的复回波参数空间与目标空间之间并没有一一对应的简单关系。为此, 还需对目标回波进行分析处理以得到各种特征信号, 对特征信号还要进行空间映射变换, 期望得到更高的同类聚合性和异类之间的可分离性, 以便于判决和分类。

在对试验数据完成目标分类之前, 首先要对已知目标测量并取得目标的训练数据, 获取训练数据的方法可以用多种手段, 例如, 目标的靶场动态测量、外场静态测量、微波暗

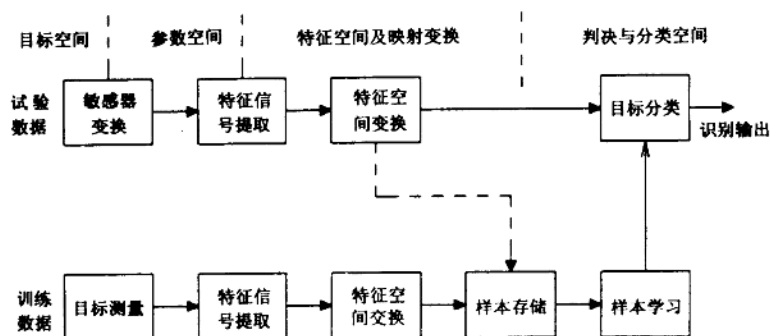


图 1-2 目标识别系统方框图

室缩比模型和风洞模型测量等。这些训练数据经特征提取与特征空间变换，存入样本空间供分类判决用。

图 1-2 中虚线部分的断开或启动，决定了识别系统是否具备自我学习的功能。当断开虚线模块时，目标分类器参数及各类目标的特征信号样本是一次性确定的，它在识别系统执行操作的过程中就不能再改变了，因而系统不具备学习的功能；当启动虚线模块时，系统可以在执行操作的过程中，通过对输入目标特征的处理，改变分类器参数及样本空间目标的类域范围，优化识别分类效能，称之为具备学习功能。在现有的技术条件下，识别系统的学习能力仅能在整个识别系统中的一个极小部分中实现，即仅能改变所存储的目标分类样本或和其类域范围，但学习过程将不可能涉及目标分类器的结构类型，也不可能涉及目标数据的特征信号提取。

1.3.6 现代雷达技术

为了实现以上所述的雷达五种功能，雷达发展 50 多年来，出现了许多先进技术，这种先进的系统技术与专业技术通称为现代雷达技术。现代雷达技术可归纳为以下几点：

- (1) 雷达系统技术；
- (2) 雷达波形设计与波形综合；
- (3) 波束形成与测角技术；
- (4) 目标特征提取与识别；
- (5) 环境与干扰抑制；
- (6) 雷达资源调度与控制；
- (7) 集成技术。

在以下的各章内将都会详细提到或叙述这些现代雷达技术，这里仅要求读者熟悉这些现代雷达技术的名称，加强对雷达整体概念的了解。

1.4 雷达使用频段

雷达设计者根据要求不同而选择雷达使用频段，这些要求包括距离、精度与分辨力等。国际公认的雷达使用频段的划分如表 1.1 所示，在每个频段内，雷达、通信与广播电视等如何再细分则由各国无线电频率管理委员会再明确。下面按照每一频率的电波传播特性和雷达性能作一简单说明，这种人为的分段并不表明雷达与传播性能会有突变，只是给读者一种概念上的理解。

表 1-1 雷达使用频段表

代 号	频 率 范 围	国际无线通信联合会 (ITU) 规定
高频 (HF)	3 ~ 30MHz	
甚高频 (VHF)	30 ~ 300MHz	138 ~ 144MHz, 216 ~ 225MHz
超高频 (UHF)	300 ~ 1000MHz	420 ~ 450MHz, 890 ~ 942MHz
P 频段	230 ~ 1000MHz	
L 频段	1000 ~ 2000MHz	1215 ~ 1400MHz
S 频段	2000 ~ 4000MHz	2300 ~ 2550MHz
C 频段	4000 ~ 8000MHz	5255 ~ 5925MHz
X 频段	8000 ~ 12500MHz	8500 ~ 10680MHz
Ku 频段	12.5 ~ 18GHz	13.4 ~ 14.4; 15.7 ~ 17.9GHz
K 频段	18 ~ 26.5GHz	24.05 ~ 24.25GHz
Ka 频段	26.5 ~ 40GHz	33.4 ~ 36.4GHz
毫米波频段	30 ~ 300GHz	
激光频段	$2 \times 10^4 \sim 7 \times 10^5$ GHz	

高频 (3 ~ 30MHz) 该频段主要用于超视距雷达。30MHz 以下电波向天空发射，经电离层 F 层一次反射可达 4000km 远的距离，能探测远距离的洲际弹道导弹的弹头，从而达到早期预警，称为天波超视距雷达；3 ~ 15MHz 可作地波传播，特别沿海面传播也能达到 400 ~ 600km 范围，因此它可以用作海面地波超视距雷达，即探测海面舰船、低空飞机与巡航导弹等。

甚高频 (30 ~ 300MHz) 在第二次世界大战中发展过这个频段的雷达，多数作为对空侦察和火炮控制使用。这个频段在传播中，不受任何气候影响，其低段频率，有时会被电离层折射返回地面，因而，对高空目标照射时，即使能通过电离层，但其传播路线会受电离层折射而弯曲，影响测角精度。这个频段的雷达，通常天线口径大，发射功率高，因而作用距离远。外部噪声电平较高，但工作频率稳定，频谱较纯，容易实现动目标显示。这种雷达研制容易，造价较低，一般作为超远距离观测人造卫星和对太空飞行器监测使用，该频段内有广播、电视与通信等常用频率，因此雷达也可以作为远距离空防警戒雷达使

用,使用时受到一定的限制。

超高频 (300~1000MHz) 这个频段的传输特性和雷达系统功能,基本上与甚高频段类似。因此,多数用于远距离警戒侦察和粗跟踪雷达。频段中的外部噪声低于甚高频段,传播不受气候条件影响,具有良好的动目标显示功能。由于这个频段是标准的超高频电视所占用,因而使用时也受到一定的限制。

L 频段 (1.0~2.0GHz) 这个频段的雷达,其发射功率、接收天线口径和动目标显示功能等都比超高频段稍差些,但外部噪声和测角精度都大有改善。因此既可用于远程防空警戒,也可用在远距离目标跟踪、指令传输和目标识别等场合,是一种全天候的多用途雷达频段。

S 频段 (2.0~4.0GHz) 在 S 频段内,外部噪声很低,天线尺寸适中,而测角精度有明显改善,因此多数作为目标定位和精密跟踪使用。由于这个频段的传播特性好,天气和电离层都不受影响,作为穿过大气层的宇宙通信更为适用。

C 频段 (4.0~8.0GHz) 这个频段的属性介于 S 与 X 波段之间,不论传播特性,还是雷达系统功能,都是上述两个波段的折衷。作为中程精密跟踪雷达,它能提供精密的测角精度,并适合于舰载使用,也符合作为靶场精密跟踪和参数测量用的精密测量雷达,作为中远程防空导弹制导雷达更为适宜。

X 频段 (8~12.5GHz) 这个频段的雷达系统,体积小,天线面积小,质量轻,携带方便,适用于车载、机载、弹载和航天器载的雷达。这个频段能提供足够的通带,能使用甚窄的脉冲或者扩展宽谱波形,称为高距离分辨雷达。

Ku, K 和 Ka 波段 (12.5~40GHz) 其中 K 波段(包括 22.2GHz)为大气中水蒸气的谐振频段,吸收电磁波能力很强,只能作短距离定点使用。其他两个频段,由于对雨的反射干扰与衰减较为严重,因此,可作为深空大气层和宇宙飞行器上的设备,特别适用于航天飞行器的交会对接雷达。

毫米波频段 (30~300GHz) 这个频段内由于大气吸收严重和气象反射强烈,而且这种衰减不是单调上升的变化,其中只有几个“窗口”频率(30~50, 70~110, 120~300GHz)可以使用。80 年代初期,毫米波高频器件发展迅速,因此应用日益广泛。由于它可做到瞬时大宽带、窄波束,因此配合纳秒脉冲技术与扩展谱技术,能实现二维、三维成像。它是防空导弹末制导雷达发展方向的优先频段。

激光频段 ($2 \times 10^4 \sim 7 \times 10^5$ GHz) 这个频段的传播,类似于红外和可见光波段,云、雾、雨都对传输有严重影响,因此在大气层内使用时,不能全天候。激光雷达的波束很窄,有时需要微波雷达作导引。它有很高的距离和角度分辨力,能区分多目标和识别目标,抗干扰性能也很强。可用于防空导弹激光末制导导引头。当功率较大时,它可烧毁人的眼睛,因此做成激光致盲雷达。

1.5 雷达发展史

这里仅就雷达在发展过程中,有重要贡献的科学研究成果,按年代和先后次序作简单的介绍,使读者对雷达的发展史有所了解,并将展望现代雷达未来的发展趋势。