

# 雷达原理

丁鹭飞 主编

西北电讯工程学院出版社

## 内 容 简 介

本书的主要内容有雷达分机和雷达测量方法，此外还较全面地讨论了雷达方程和动目标检测(MTD)雷达。雷达分机部分包括发射机、接收机、终端显示和录取设备的组成、基本工作原理和主要质量指标；雷达测量方法部分包括雷达测距、测角、测速的基本原理和各种实现方法，并讨论了雷达多种工作体制的原理，诸如：连续波、三坐标、相控阵、圆锥扫描、单脉冲等。本书内容反映了当前雷达新技术的发展状况。

本书可供工科院校雷达专业使用，也可作为有关专业科技人员的参考书。

高等学校教材

## 雷 达 原 理

丁鹭飞 主编

---

西北电讯工程学院出版社出版

空军通信学校印刷厂印刷

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 21 4/16 字数 518千字

1984年11月第一版 1984年11月第一次印刷 印数 1-7,000

---

统一书号：15322·6

定价：2.95元

## 出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材159种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》，中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构，并制定了一九八二~一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共217种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者，各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

## 前 言

本教材系由无线电技术信息系统教材编审委员会雷达教材编审小组评选审定，并推荐出版。

本教材由西北电讯工程学院丁鹭飞担任主编，国防科技大学黄刚强和北京工业学院程之明担任主审。编审者均依据雷达编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅。

本课程的参考教学时数为50~70学时，其主要内容有雷达分机和雷达测量方法。雷达分机部分包括雷达发射机、雷达接收机、终端显示和录取设备的组成、基本工作原理及主要质量指标（天线馈线系统因开设有专门课程，故在本教材中不单独设章）；雷达测量方法部分包括雷达测距、测角、测速的基本原理和各种实现方法，并讨论了雷达多种工作体制的基本工作原理，诸如：连续波、三坐标、相控阵、圆锥扫描、单脉冲等。此外，本教材还较全面地讨论了雷达方程和动目标检测（MTD）雷达。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有关内容。

本教材由丁鹭飞编写第一、五、六、八章，耿富录编写第二、三、四章，黄银度编写第七章，由丁鹭飞统编全稿。参加审阅工作的还有成都电讯工程学院张明友、王意清同志，他们对本教材提出了许多宝贵意见，在这里对他们表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

<b>第一章 结论</b> .....	(1)
§ 1.1 雷达的任务 .....	(1)
§ 1.2 雷达的基本组成 .....	(4)
§ 1.3 雷达的工作频率 .....	(6)
§ 1.4 雷达的应用 .....	(7)
§ 1.5 雷达的战术参数 (应用参数) 和技术参数 .....	(10)
§ 1.6 雷达技术发展的阶段及动向 .....	(12)
<b>第二章 雷达发射机</b> .....	(17)
§ 2.1 雷达发射机的任务和基本组成 .....	(17)
§ 2.2 雷达发射机的主要质量指标 .....	(18)
§ 2.3 单级振荡和主振放大式发射机 .....	(22)
§ 2.4 脉冲调制器 .....	(29)
§ 2.5 固态发射机 .....	(36)
<b>第三章 雷达接收机</b> .....	(42)
§ 3.1 雷达接收机的组成和主要质量指标 .....	(42)
§ 3.2 接收机的噪声和灵敏度 .....	(45)
§ 3.3 雷达接收机的高频部分 .....	(54)
§ 3.4 本机振荡器和自动频率控制 .....	(61)
§ 3.5 接收机的动态范围和增益控制 .....	(68)
§ 3.6 滤波和接收机带宽 .....	(74)
<b>第四章 目标显示与数据录取</b> .....	(81)
§ 4.1 显示器的主要类型和画面 .....	(81)
§ 4.2 距离显示器 .....	(84)
§ 4.3 平面位置显示器 .....	(89)
§ 4.4 情况显示器的字符显示 .....	(97)
§ 4.5 情况显示器的图形显示和矢量产生器.....	(105)
§ 4.6 雷达数据的录取.....	(113)
§ 4.7 综合显示器简介.....	(123)
<b>第五章 雷达作用距离</b> .....	(130)
§ 5.1 雷达方程.....	(130)
§ 5.2 最小可检测信号.....	(132)

§ 5.3	脉冲积累对作用距离的改善	(139)
§ 5.4	目标截面积及其起伏特性	(142)
§ 5.5	系统损耗	(154)
§ 5.6	传播过程中各种因素的影响	(158)
§ 5.7	雷达方程的几种形式	(166)
<b>第六章</b>	<b>目标距离的测量</b>	<b>(174)</b>
§ 6.1	脉冲法测距	(174)
§ 6.2	调频法测距	(181)
§ 6.3	相位法测距	(187)
§ 6.4	距离跟踪原理	(189)
§ 6.5	数字式自动测距器	(198)
<b>第七章</b>	<b>角度测量</b>	<b>(208)</b>
§ 7.1	概述	(208)
§ 7.2	测角方法及其比较	(209)
§ 7.3	天线波束的扫描方法	(215)
§ 7.4	仰角和高度的测量	(231)
§ 7.5	三坐标雷达	(234)
§ 7.6	自动测角的原理和方法	(245)
<b>第八章</b>	<b>运动目标检测及测速</b>	<b>(263)</b>
§ 8.1	多卜勒效应及其在雷达中的应用	(263)
§ 8.2	动目标显示雷达的工作原理及主要组成	(274)
§ 8.3	盲速、盲相的影响及其解决途径	(279)
§ 8.4	回波和杂波的频谱及动目标显示滤波器	(289)
§ 8.5	动目标显示雷达的工作质量及质量指标	(298)
§ 8.6	数字式动目标显示 (DMTI) 和动目标检测 (MTD)	(304)
§ 8.7	非相参 (干) 运动目标显示	(316)
§ 8.8	自适应动目标显示系统	(319)
§ 8.9	速度测量	(322)

# 第一章 绪 论

## § 1.1 雷达的任务

雷达是英文 Radar 的音译，它是 Radio Detection and Ranging 的缩写，原意是“无线电检测和测距”，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，并从目标回波中取得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、各种舰艇、车辆、兵器、炮弹以及建筑物、山川、云雨等等都可能作为雷达的探测目标，这要根据雷达用途而定。

下面分别讨论雷达目标空间位置的测量和雷达的检测能力。

### 1.1.1 目标位置的测量

目标在空间、陆地或海面上的位置，可以用多种坐标系表示。最常见的是直角坐标系，空间任一点目标  $P$  的位置可用  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个坐标值来决定。在雷达应用中，测定目标坐标常采用极（球）坐标系，如图1.1所示。图中，空间任一目标  $P$  所在位置可用下列三个坐标确定：

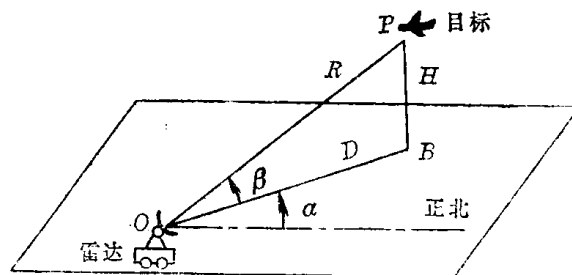


图1.1 用极(球)坐标系表示目标位置

(1) 目标的斜距  $R$ ——雷达到目标的直线距离  $OP$ ；

(2) 方位角  $\alpha$ ——目标的斜距  $R$  在水平面上的投影  $OB$  与某一起始方向（正北、正南或其它参考方向）在水平面上的夹角。

(3) 仰角  $\beta$ ——斜距  $R$  与它在水平面上的投影  $OB$  在铅垂面上的夹角，有时也称为倾角或高低角。

如需要知道目标的高度和水平距离，那么利用圆柱坐标系就比较方便。在这种系统中，目标的位置由以下三个坐标来确定：

水平距离  $D$ ；方位角  $\alpha$ ；高度  $H$ 。

这两种坐标系之间的关系如下：

$$D = R \cos \beta; \quad H = R \sin \beta; \quad \alpha = \alpha$$

上述这些关系仅在目标的距离不太远时是正确的，当距离较远时，由于地面的弯曲，必须作适当的修正。

现以典型的脉冲雷达为例来说明雷达测量的基本工作原理。图1.2示出这种雷达的简化示意图，它由一个发射天线（用来发射电磁波）、一个接收天线和一个能量检测装置

(接收机)所组成。发射的电磁波中一部分能量被雷达目标所接收,并且在各个方向上产生二次散射。雷达接收天线收集散射回来的能量并送至接收机对回波信号进行处理,从而发现目标的存在,并提取目标位置和目标的速率等信息。实际的脉冲雷达发射和接收共用一个天线,以使结构简化,体积重量减小。

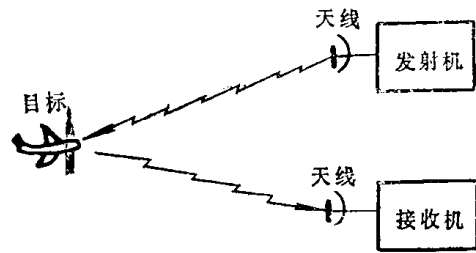


图1.2 雷达基本组成示意

脉冲雷达采用的波形通常是高频脉冲串,其重复周期是一定的。它是由窄脉冲调制正弦载波产生的,调制脉冲的形状一般为矩形,也可采用其它形状。目标离开雷达站的斜距由雷达信号往返于目标与雷达之间的时间来确定;目标的角位置决定了二次散射波前到达的方向;当目标对雷达站有相对运动时,雷达所接收到的二次反射波的载波频率会发生偏移,即一般称为多卜勒频移,测量载频偏移就可以由此求出目标的相对速度,并且可以从固定目标中区别出运动目标来。上面讨论的是雷达测距、测角、测速的物理基础,现再分别予以说明。

分别予以说明。

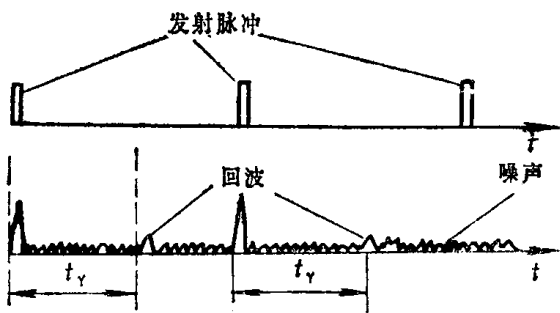


图1.3 雷达测距

### 1. 目标斜距的测量

雷达工作时,发射机经天线向空间发射一串重复周期一定的高频脉冲,如果在电磁波传播的途径上有目标存在,那么雷达就可以接收到由目标反射回来的回波。由于回波信号往返于雷达与目标之间,它将滞后于发射脉冲一个时间  $t_r$ ,如图1.3所示。我们知道电磁波的能量是以光速传播的,设目标的距离为  $R$ ,则传播的距离等于光速乘上时间间隔,即

$$2R = ct_r$$

或

$$R = \frac{ct_r}{2}$$

式中  $R$ ——目标到雷达站的单程距离,以米为单位;

$t_r$ ——电磁波往返于目标与雷达之间的时间间隔,以秒为单位;

$c$ ——光速为  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

距离的单位在国内常用 km (公里) 或 m (米) 表示,国外有采用 mile (英里)、ft (英尺)、n mile (海里) 或用 yd (码) 来表示的,它们之间的换算关系如下:

$$1000 \text{ yd} = 3000 \text{ ft} = 0.914 \text{ km} \approx 0.6 \text{ mile}$$

$$1 \text{ n mile} = 1.853 \text{ km}$$

由于电磁波传播的速度很快,雷达技术常用的时间单位为微秒,回波脉冲滞后于发射脉冲为一个微秒时,所对应的目标斜距离  $R$  为

$$R = \frac{c}{2} t_r = 150 \text{ m} = 0.15 \text{ km} = 0.081 \text{ n mile} = 0.093 \text{ mile} = 164 \text{ yd} = 492 \text{ ft}$$



## 2. 目标角位置的测量

目标角位置指方位角或仰角，在雷达技术中测量这两个角位置基本上都是利用天线的方向性来实现的。雷达天线将电磁能量汇集在窄波束内，当天线波束轴对准目标时，回波信号最强，如图 1.4 实线所示；当天线波束轴偏离目标时回波信号减弱，如图上虚线所示。根据接收回波最强时的天线波束指向，就可确定目标的方向，这就是角坐标测量的基本原理。天线波束指向实际上也是辐射波前的方向。

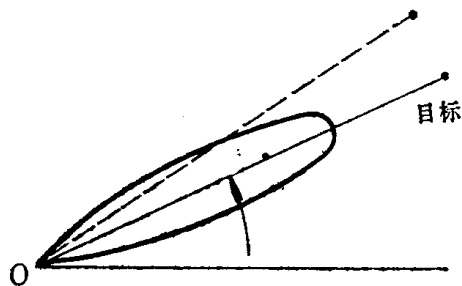


图1.4 角坐标测量

角坐标的单位通常用弧度、度或密位来表示。将圆周分为6,000等分，每一等分对应的角度称为1密位，因此圆周 $2\pi$ 弧度等于6,000密位。各角度单位之间的换算关系为

$$1\text{rad}=57.3^\circ, 1^\circ=16.7\text{密位}, 1\text{密位}=0.06^\circ$$

## 3. 相对速度的测量

有些雷达除确定目标的位置外，还需测定运动目标的相对速度，例如测量飞机或导弹飞行时的速度。当目标与雷达站之间存在相对速度时，接收到回波信号的载频就要相对于原来的发射信号的载频产生一个频移，这个频移在物理学上称为多卜勒频移，它的数值为

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda}$$

式中  $f_d$ ——多卜勒频移 (Hz)；

$v_r$ ——雷达与目标之间的径向速度 (m/s)； $\lambda$ ——载波波长 (m)。

当目标向着雷达站运动时 $v_r > 0$ ，回波载频提高；反之 $v_r < 0$ ，回波载频降低。雷达只要能够测量出回波信号的多卜勒频移 $f_d$ ，就可以确定目标与雷达站之间的相对速度。

### 1.1.2 雷达检测能力——基本雷达方程

雷达究竟能在多远距离上发现（检测到）目标，这要由雷达方程来回答。雷达方程将雷达的作用距离和雷达发射、接收、天线和环境等因素联系起来。因此它不仅可以用来决定雷达检测某类目标的最大作用距离，也可以作为了解雷达的工作关系和用作设计雷达的一种工具。

下面根据雷达的基本工作原理来推导雷达方程：

设雷达发射机功率为 $P_t$ ，当用各向均匀辐射的天线发射时，距雷达 $R$ 远处任一点的功率密度 $S_1'$ 等于功率被假想的球面积 $4\pi R^2$ 所除，即

$$S_1' = \frac{P_t}{4\pi R^2}$$

实际雷达总是使用定向天线将发射机功率集中辐射于某些方向上。天线增益 $G$ 表示比起各向同性天线来，实际天线在辐射方向功率增加的倍数。因此当发射天线增益为 $G$ 时，距雷达 $R$ 处目标所照射到的功率密度为

$$S_1 = \frac{P_t G}{4\pi R^2}$$

目标截获了一部分照射功率并将它们重新辐射于不同的方向。用雷达截面积 $\sigma$ 来表示被目标截获入射功率后再次辐射回雷达处功率的大小，或用下式表示在雷达处的回波信号功率密度：

$$S_2 \approx S_1 \frac{\sigma}{4\pi R^2} = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R^2}$$

截面积 $\sigma$ 的量纲是面积。 $\sigma$ 的大小随具体目标而异，它可以表示目标被雷达“看见”的尺寸。雷达接收天线只收集了回波功率的一部分，设天线的有效接收面积为 $A_e$ ，则雷达收到的回波功率 $P_r$ 为

$$P_r = A_e \cdot S_2 = \frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi)^2 R^4}$$

当接收到的回波功率 $P_r$ 等于最小可检测信号 $S_{min}$ 时，雷达达到其最大作用距离 $R_{max}$ 。超过这个距离后，就不能有效地检测到目标。

$$R_{max} = \left[ \frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi)^2 S_{min}} \right]^{1/4}$$

上述基本雷达方程可以正确地反映雷达各参数对其检测能力影响的程度，但并不能充分反映实际雷达的性能。因为许多影响作用距离的因素在方程中没有包括。关于雷达作用距离的深入讨论将在第五章展开。

## § 1.2 雷达的基本组成

现以普通脉冲雷达为例来说明雷达的基本组成及其作用。如图 1.5 所示，它主要由天线和天线收发开关、发射机、接收机、终端设备、天控设备及定时器等所组成。雷达工作时，定时器控制发射机，产生高频大功率的脉冲串，经过定向天线向空间辐射电磁波。在天线控制设备的作用下，天线波束按照指定的方式在空间扫描。当电磁波照射到目标时，二次散射电磁波的一部分到达雷达天线，再经由接收机进行放大、混频等处理以后，送到雷达终端设备，以便对回波进行处理后，得到所需的观测波形和数据。

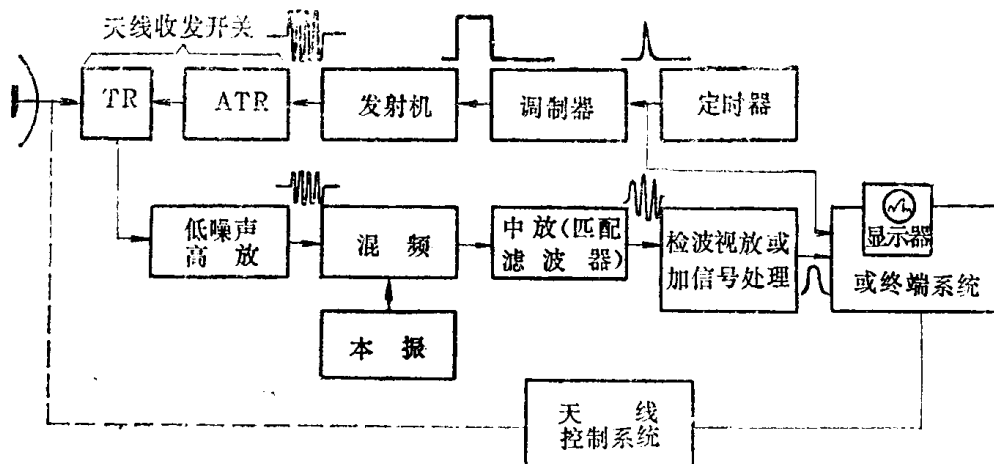


图1.5 脉冲雷达的简单方框图

发射机一般有二种类型，一种是以功率振荡器作为发射机的末级（例如磁控管振荡器或大功率三、四极管振荡器等），调制器在定时器送来的触发脉冲控制下，形成宽度为 $\tau$ 重复频率为 $f$ 的大功率调制脉冲。在调制脉冲的作用下，功率振荡器产生高频大功率脉冲信号。这种方式称为功率振荡式（或单级振荡式）发射机。另一种是以功率放大器作为发射机末级，预先产生高稳定度的高频脉冲串信号，在发射机中将高频脉冲串逐步地进行功率放大，直到最末一级的高功率放大器形成了大功率高频脉冲波。这种发射机称为功率放大式（主振放大式）发射机。

发射机产生的高频脉冲通过传输线送到天线，尔后经天线定向地辐射到空中去。

脉冲雷达的天线是收发共用的，这需要一种开关装置（收发转换开关 TR），使发射时，天线与发射机接通，并与接收机断开，以免强大的发射功率进入接收机把接收机高放混频部分烧毁；接收时，天线与接收机接通，并与发射机断开（反收发开关 ATR 使天线与发射机断开），以免微弱的接收功率因发射机旁路而减弱。这种装置称为天线收发开关。天线收发开关属于高频馈线中的一个部分，通常由高频传输线和放电管组成，或用环行器及隔离器等来实现。

接收机多为超外差式，由高频放大（有些雷达接收机不用高频放大）、混频、中频放大、检波、视频放大等电路所组成。接收机的首要任务是把微弱的回波信号放大到足以进行信号处理的电平。同时接收机内部的噪声应尽量小以保证接收机的高灵敏度。因此接收机的第一级常采用低噪声高频放大器。一般在接收机中也进行一部分信号处理，例如中频放大器的频率特性应设计为发射信号的匹配滤波器，这样就能在中放输出端获得最大的峰值信号噪声功率比。在需要进行较复杂信号处理的雷达；例如需分辨固定杂波和运动目标回波而将杂波滤去，则可以由典型接收机后接的信号处理机完成。

通常情况下，接收机中放输出后经检波器取出脉冲调制波形，由视频放大器放大后送到终端设备。最简单的终端是显示器。例如在平面位置显示器（PPI）上可根据目标亮弧的位置，测读目标的距离和方位角二个坐标。（详见第四章显示器）

显示器除了可以直接显示由雷达接收机输出的原始视频外，还可以显示经过处理的信息。例如由自动检测和跟踪设备（ADT）先将收到的原始视频信号（接收机输出）按距离方位分辨单元分别积累，尔后经门限检测取出较强的回波信号而消去大部分噪声，对门限检测后的每个目标建立航迹跟踪。按照需要将经过上述处理的回波信息加到终端显示器去。自动检测和跟踪设备的各种功能常要依靠数字计算机来完成。

定时器的作用相当于是整个雷达的时钟，它使雷达各个分机保持同步工作。在功率放大式脉冲雷达中，定时器往往由频率综合器组成。而由频率综合器所产生的各种频率振荡波，相互之间保持严格的相位关系。

脉冲雷达天线一般具有很强的方向性，以便集中辐射能量获得较大的观测距离。同时，当天线的方向性越强时，天线波瓣宽度越窄，雷达测向的精度和分辨力越高。常用微波雷达的天线是抛物面反射体，馈源放置在焦点上，天线反射体将高频能量聚成窄波束。天线波束在空间的扫描常采用机械转动天线而得到，由天线控制系统来控制天线在空间的扫描，控制系统同时将天线的转动数据送到终端设备以便取得天线指向的角度数据。因此天线控制系统的性能直接影响雷达的测向精度和灵活性。天线机械扫描常采用机电传动或

液压传动。当雷达使用相控天线时，天线波束的空间扫描可以采用电子的办法，例如控制天线孔径面上移相器的相移量获得波束扫描。

上述雷达方框图是简化后的基本方框，它省略了许多部分：例如接收机的抗干扰电路和重要的附属电路(自动频率微调、自动增益控制等)；天线旋转时传输系统的转动关节；分辨运动目标和固定杂波的动目标显示 (MTI) ；复杂信号波形 (如线性调频脉压等) 的应用；等等。如果是跟踪类型雷达，还应包括角度误差信号鉴别以及自动跟踪目标的系统等部分。这些问题均将在以后各章中分别讨论。

### § 1.3 雷达的工作频率

从雷达的工作原理来说，不论发射波的频率如何，只要是通过辐射电磁能量和利用从目标反射回来的回波，以便对目标探测和定位，都属于雷达系统工作的范畴。常用的雷达工作频率范围为 220~35,000MHz (220MHz~35GHz)，实际上各类雷达工作的频率在两头都超过了上述范围。例如天波超视距(OTH)雷达的工作频率为 4 或 5MHz，而地波超视距的工作频率则低到 2MHz。在频谱的另一端，毫米波雷达可以工作到 94GHz，激光 (Laser) 雷达工作于更高的频率。

雷达的工作频率和整个电磁波频谱示于图 1.6，实际上绝大部分雷达工作于 200MHz 至 10000MHz 频段。由于七十年代中制成能产生毫米波的大功率管——回旋管，毫米波雷达已开始试制和应用。

目前在雷达技术领域里常用频段的名称，用 L、S、C、X 等英文字母来命名，这是在第二次世界大战中一些国家为了保密而采用的，以后就一直沿用下来，我国也经常采用。

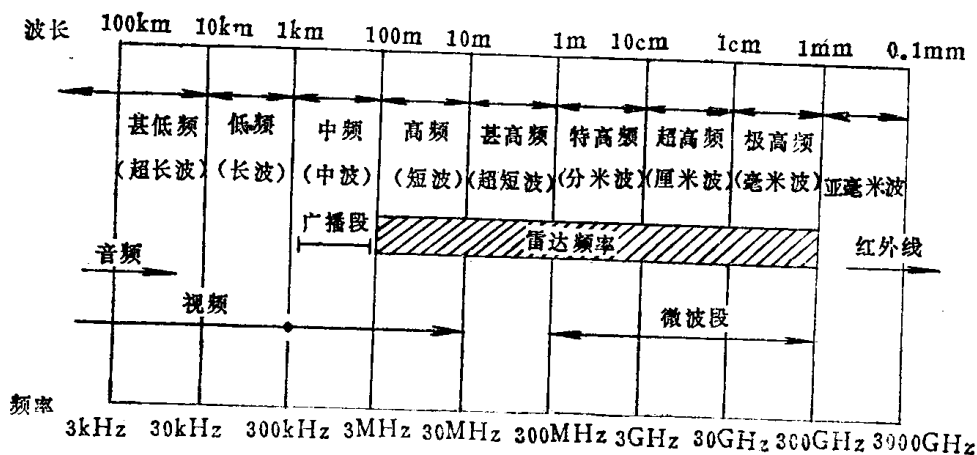


图1.6 雷达频率和电磁波频谱

表1.1 列出雷达频段和频率对应的关系。

表1.1 雷达频段和对应的频率

频段名称	频率	国际电信联盟分配的雷达频段
UHF波段	300~1000MHz	420~450MHz 890~940MHz
L 波段	1000~2000MHz	1215~1400MHz
S 波段	2000~4000MHz	2300~2500MHz 2700~3700MHz
C 波段	4000~8000MHz	5250~5925MHz
X 波段	8000~12500MHz	8500~10680MHz
Ku 波段	12.5~18GHz	13.4~14GHz 15.7~17.7GHz
K 波段	18~26.5GHz	24.05~24.25GHz
Ka 波段	26.5~40GHz	33.4~36GHz
mm 波段	40~300GHz	

表1.1的频段有时以波长来表示，如L波段代表以22cm为中心的20~25cm（S代表10cm为中心，相应地C代表5cm、X代表3cm、Ku代表2.2cm、Ka代表8mm等）。表中还列出国际电信联盟分配给雷达的具体波段，例如，L波段包括的频率范围应是1000到2000MHz，而L波段雷达的工作频率却被约束在1215到1400MHz的范围。

## § 1.4 雷达的应用

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，特别是近二十多年来雷达技术有了迅速的发展，雷达已在军事的各个方面获得应用。这些技术成果也同时在民用雷达方面发挥日益增长的作用。下面列举一些军用和民用方面雷达应用的情况。

军用雷达按战术来分可有下列主要类型：

1) 预警雷达（也称超远程雷达）它的主要任务是发现洲际导弹，以便及早发出预警警报。它的特点是作用距离远达数千公里，至于测定坐标的精确度和分辨力是次要的。目前应用预警雷达不但能发现导弹，而且可用以发现洲际战略轰炸机。

2) 搜索和警戒雷达 其任务是发现飞机，一般作用距离在四百公里以上，有的可达六百公里。对于测定坐标的精确度、分辨力要求不高。保卫重点城市或建筑物的中程警戒雷达要求有方位360°的搜索空域。

3) 引导指挥雷达（又称监视雷达）这种雷达用于对歼击机的引导和指挥作战，民用的机场调度雷达亦属这一类。其特殊要求是：（1）对多批次目标能同时检测；（2）测定目标的三个坐标；要求测量目标的精确度和分辨力较高，特别是目标间的相对位置数据的精度要求较高。

近十多年来发展的趋势是把搜索和引导指挥雷达的功能，由一部称为机载预警雷达所替代，装置这部预警雷达的飞机也称为预警飞机。地面的预警雷达，由于对低飞目标存在

盲区而只能发现数十公里处的低飞目标。六十年代中由于脉冲多卜勒体制的研制成功，在七十年代中把具有这种体制的预警雷达装置在预警机上，使它能在地面杂波干扰比飞机信号强得多的情况下，仍能把目标检测出来。十多年来由于雷达技术的进展，装置在预警飞机上的预警雷达同时兼有引导指挥雷达的功能，因此预警飞机实际上把地面区域防空指挥所也搬到了飞机上去，使它成为一个完整的空中预警和控制系统，目前国外一些国家已正式使用。这是当前一种很重要的雷达类型。

4) 火控雷达 (原称炮瞄雷达) 其任务是控制火炮 (或地空导弹) 对空中目标进行瞄准攻击。因此要求它能够连续而准确地测定目标的坐标，并迅速地将射击数据传递给火炮 (或地空导弹)。这类雷达的作用距离较小，一般只有几十公里，但测量的精度要求很高。

5) 制导雷达 它和炮瞄雷达同属精密跟踪雷达，不同的是制导雷达对付的是飞机和导弹，在测定它们的运动轨迹的同时，再控制导弹去攻击目标。制导雷达要求能同时跟踪多个目标，并对分辨力要求较高。这类雷达天线的扫描方式往往有其特点，并随制导体制而异。

6) 战场监视雷达 用于发现坦克、军用车辆、人和其它在战场上的运动目标，作用距离只有数公里。

7) 机载雷达 主要有下列数种类型。

机载截击雷达 当歼击机按照地面指挥所命令，接近敌机并进入有利空域时，就利用装在机上的截击雷达，准确地测量敌机的位置，以便进行攻击。它要求测量目标的精确度和分辨率高，但作用距离不要求很远，一般只有15~20km。

机载轰炸瞄准雷达 这是装在轰炸机上的雷达，用于观察地面图象并确定投弹位置。这种雷达配备有专用计算装置，将飞机自身的速度、高度及风速等诸元进行综合计算，以确定投弹的位置。

机载护尾雷达 它用来发现和指示机尾后面一定距离内有无敌机。这种雷达结构比较简单，不要求测定目标的准确位置，作用距离也不远。

机载导航雷达 它装在飞机或舰船上用以显示地面或港湾图象，以便在黑夜和大雨、浓雾情况下，飞机和舰船能正确航行，这种雷达要求分辨力较高。

七十年代的战斗机上火控系统的雷达往往是多功能的，它能空对空搜索和截获目标、空对空制导导弹、空对空精密测距和控制机炮射击、空对地观察地形和引导轰炸、敌我识别和导航信标的识别，有的还兼有地形跟随和回避的作用，一部雷达往往具有七、八部雷达的功能。对于机载雷达共同的要求是体积小、重量轻、工作可靠性高。

8) 无线电测高仪 它装置在飞机上。这是一种连续波调频雷达，用来测量飞机离开地面或海面的高度。

9) 雷达引信 是装置在炮弹或导弹头上的一种小型雷达，用来测量弹头附近有无目标，当距离缩小到弹片足以击伤目标的瞬间，使炮弹 (或导弹头) 爆炸，提高了击中目标的命中率。

上述军用雷达中，机载导航雷达，无线电测高仪等也可作为民用。

在民用雷达方面，举出以下一些类型和应用：

1) 气象雷达 这是观察气象的雷达, 用来测量暴风雨和云层的位置及其移动路线。

2) 航行管制(空中交通)雷达 在现代航空飞行运输体系中, 对于机场周围及航路上的飞机, 都要实施严格的管制。航行管制雷达兼有警戒雷达和引导雷达的作用, 有时也称为机场监视雷达, 它和二次雷达配合起来应用。二次雷达地面设备发射询问信号, 机上接到信号后, 用编码的形式, 发出一个回答信号, 地面收到后在航行管制雷达显示器上显示, 可以鉴定空中目标的高度、速度和属性, 用以识别目标。

3) 宇宙航行中用雷达来控制飞船的交会和对接, 以及在月球上的着陆。某些地面上的雷达用来探测和跟踪人造卫星。

4) 遥感 安放在卫星或飞机上的某种雷达, 可以作为微波遥感设备, 它主要感受地球物理方面的信息。有时雷达用作为气象的遥感, 过去也曾利用雷达来探测月亮和行星(雷达天文学)。雷达遥感也参与地球资源的勘探, 其中包括对海的情况、水资源、冰覆盖层、农业森林、地质结构及环境污染等情况进行测量和地图描绘。

此外在飞机导航、航道探测以保证航行安全、公路上车速测量等方面, 雷达也在发挥其积极作用。

为了满足多种用途不同的要求, 雷达的种类是很多的。例如, 按照雷达信号的形式分类, 有

1) 脉冲雷达 它发射的波形是矩形脉冲, 按一定的或交错的重复周期工作, 这是目前使用最广的。

2) 连续波雷达 它发射连续的正弦波, 主要用来测量目标的速度, 如同时需测量目标的距离, 往往对发射信号进行调制, 例如对连续的正弦信号进行周期性的频率调制。

3) 脉冲压缩雷达 它发射宽的脉冲波, 在接收机中对收到的回波信号加以压缩处理, 以便得到窄脉冲。目前实现脉冲压缩主要有两种: 线性调频脉冲压缩和相位编码脉冲压缩处理, 以便得到窄脉冲。它能解决距离分辨力和作用距离之间的矛盾。在七十年代研制的新型雷达极大部分采用脉冲压缩的体制。本书后面将详细讨论这种雷达。

线性调频脉压体制的发射波形是一个很宽的脉冲, 在脉冲之内, 载波频率由低到高(或由高到低)按线性规律进行调制。在接收机中采用对回波信号进行脉冲压缩的压缩滤波器, 或称匹配滤波器, 使接收机输出端的回波信号, 在终端装置中得到较好的分辨力。

相位编码脉压体制是将宽脉冲分为许多窄的子脉冲, 这些子脉冲宽度相等, 各调制以特殊的相位(一般采用 $0^\circ$ 和 $180^\circ$ 之间交替变换), 相位根据采用的编码而变化。在接收机中采用压缩滤波器, 以便得到窄脉冲。

此外还有脉冲多卜勒雷达、噪声雷达、频率捷变雷达等。也可以按其它标准对雷达进行分类, 例如:

1) 按角跟踪方式分, 有单脉冲雷达、圆锥扫描雷达、隐蔽锥扫雷达等。

2) 按测量目标的参量分, 有测高雷达、两坐标雷达、三坐标雷达、测速雷达、目标识别雷达等。

3) 按信号处理方式分, 有各种分集雷达(频率分集, 极化分集等等)、相参或非相参积累雷达、动目标显示雷达、合成孔径雷达等。

4) 按天线扫描方法分, 有机械扫描雷达、相控阵雷达、频扫雷达等。

## § 1.5 雷达的战术参数（应用参数）和技术参数

雷达的性能可分为战术(应用)性能和技术性能两大方面, 战术(应用)性能说明雷达的用途和能力; 技术性能说明雷达各组成分机的技术性能。雷达的技术性能和战术(应用)性能是密切联系的, 前者往往根据后者的要求而确定。

雷达的主要战术(应用)参数包括:

1) 雷达的用途。

2) 雷达的威力范围 它由最大作用距离、最小作用距离、最大仰角、最小仰角及方位角范围决定。

3) 分辨力 它表示雷达区分点目标在位置上靠近的能力, 两个点目标可能在距离上和角度上很接近, 因此分辨力又分为距离分辨力和角度分辨力。

距离分辨力是指同一方向上两个目标之间最小可区别的距离 $\Delta R$ , 如图1.7 (a)所示, 如果两个点目标的距离小于 $\Delta R$ , 那么它们的回波在显示器上或其他终端显示设备上就重叠在一起, 不能分辨出来。角分辨力是指在相同距离上的两个不同方向的点目标之间最小能区别的角度 $\Delta\theta$ , 如图1.7 (b)所示, 在水平面的分辨力称为方位分辨力, 在铅垂面内的分辨力称为高低角分辨力。

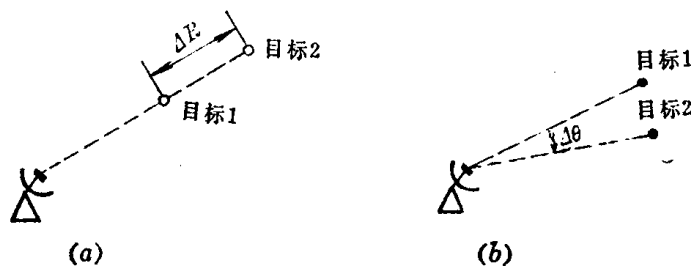


图1.7 雷达分辨力

(a) 距离分辨力; (b) 角度分辨力

4) 数据率 雷达对整个威力范围内完成一次搜索(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所能提供对一个目标数据的次数。时间的单位一般用秒, 个别也有用分表示的; 有时数据率直接用上述所需时间来表示。数据率表征搜索雷达和三坐标雷达的工作速度。

5) 跟踪速度 自动跟踪雷达连续跟踪运动目标的最大可能速度。

6) 抗干扰能力 雷达通常在各种自然干扰和人为干扰的条件下工作; 军事使用时主要是敌人施放的干扰, 例如偶极子干扰和使用干扰发射机产生的干扰等。干扰最后作用于雷达显示设备或其它终端设备, 严重时可能使雷达失去工作能力。近代雷达必须具有一定程度的抗干扰能力。

7) 雷达测定目标坐标的数目和精确度。

8) 抗核爆炸和轰炸能力。

9) 体积和重量。



10) 工作的可靠性 平均故障时间, 平均修复时间。

11) 使用条件 包括运输条件、架设和撤收时间、连续工作时间、机动性等等。

雷达的主要技术参数包括:

1) 工作频率(波长)及其范围 雷达的工作频率主要根据目标的特性、电波传播条件、天线的尺寸、高频器件的性能及测量精确度的要求等来决定;工作的频率范围主要根据抗干扰的要求来决定。

2) 发射功率和调制波形 脉冲雷达的发射功率分为脉冲功率和平均功率。发射功率的大小直接影响雷达的作用距离,但功率大小还受器件、电馈源容量和体积等条件限制,要根据情况适当选择。一般警戒雷达的峰值功率为兆瓦数量级,火控雷达的峰值功率则为几百千瓦。

发射信号的调制波形在早期雷达中常采用简单的脉冲波形,近代雷达则多采用多种复杂波形,以适应雷达的各种不同任务。

3) 脉冲宽度 是指脉冲雷达发射信号时占的时间,一般雷达的脉冲宽度是不变的,但复杂雷达工作时,可以有多种脉宽和调制波形以供选择。脉冲宽度除影响雷达探测能力之外,还影响雷达的距离分辨力。

4) 重复频率 是指发射机每秒钟发射的脉冲个数,其倒数是重复周期。重复频率既决定了雷达单值测距的范围,也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。

5) 天线波束形状 天线波束形状一般用水平面和垂直面内的波束宽度来表示。米波雷达的波束宽度在十度量级,而厘米波雷达的波束宽度在几度左右。炮瞄或制导雷达的波束是针状的;两坐标雷达的波束在方位上要求窄,在仰角上可以宽一些;测高雷达的波束则与之相反,在仰角上要窄,而在方位上宽一些。此外还有一些其他形状的波束。

6) 天线的扫描方式 搜索和跟踪目标时,天线的主瓣按照一定规律在空间所作的反复运动,称为天线波束扫描。它可分为机械扫描和电扫描两大类。按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。

7) 接收机的灵敏度 接收机收到的回波信号功率是非常微弱的。接收机的灵敏度大小决定于接收机所能感受的输入功率的大小。通常规定在保证50%~90%的发现概率条件下,接收机输入端回波信号的功率作为接收机的最小可检测信号功率,这个功率越小,接收机的灵敏度越高,雷达的作用距离就越大。

8) 显示器的形式和数量 雷达显示器是向操纵人员提供雷达信息的一种终端设备,是人机联系的一个环节。

根据雷达的任务与性质的不同。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。可以是直接显示由接收机输出的雷达原始信息,也可能显示经过处理和加工后的雷达数据。