

雷 达 系 统

西北电讯工程学院《雷达系统》编写组 编

国防工业出版社

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”，亦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，以及目标形态等特性。

雷达是利用目标对电磁波的反射（或称为二次发射）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、云雨等等都可以作为雷达的探测目标。

目标在空间、陆地或海面上的位置，可以表示在一种坐标系中。最常见的是直角坐标系，空间任意一点目标 P 的位置可用 X 、 Y 、 Z 三个坐标来决定。在雷达技术中，测定目标的坐标往往是目标离开雷达的斜距，以及目标的方位角和仰角，因此往往采用球坐标系，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下来：

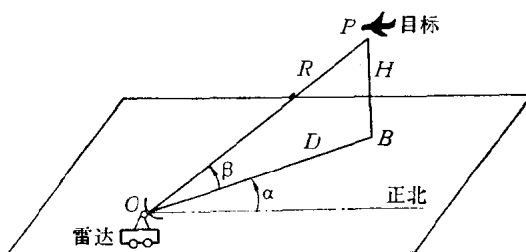


图1.1 用球坐标系表示目标位置

(1) 目标的斜距 R ——雷达到目标的直线距离 OP 。

(2) 方位角 α ——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 β ——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 α ；高度 H 。

在近代雷达站中装有坐标转换装置，或用计算机解算。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。

由于雷达具有较大的作用距离，并在能见度很差的情况下也可以工作，因此在军事上具有多种用途。能作为发现目标之用，也能自动搜索和精密跟踪，还可以显示目标的批次、航迹以及进行目标识别，附加一定的设备还可以识别敌我等等。此外，雷达也日益广泛地应用到民用事业和各项科学研究中，如气象、航海、地图测绘、天文、探矿、交通

管制、宇宙航行等。

§ 1.2 雷达的基本工作原理

现以典型的脉冲雷达为例来说明雷达的基本工作原理。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反射。雷达接收天线收集反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。

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。雷达站离开目标的斜距决定于雷达信号往返于目标与雷达之间的时间；目标的角位置决定于二次反射波前到达的方向；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，即一般称为多普勒频移，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。

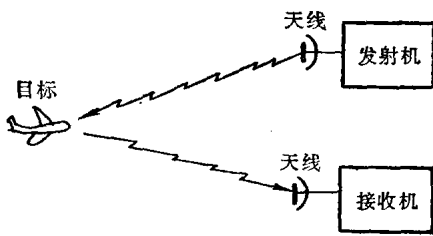


图1.2 雷达基本方框图

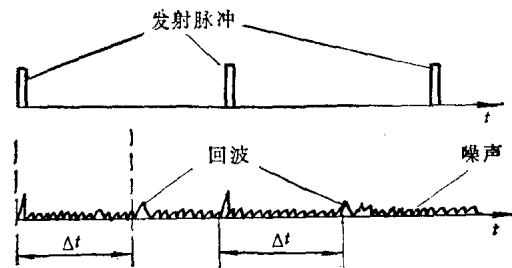


图1.3 雷达测距原理图

1. 目标斜距的测量

雷达工作时，发射机向外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间隔 Δt ，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

$$2R = c\Delta t$$

或

$$R = \frac{c\Delta t}{2}$$

式中 R ——目标到雷达站的单程距离，以米为单位；

Δt ——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 3×10^8 米/秒。

距离的单位在国内常用公里或米表示，国外有采用英里、英尺、海里或用码来表示的，它们之间的换算关系如下：

1000 码 = 3000 英尺 = 0.914 公里 \approx 0.6 英里

1 海里 = 1.853 公里

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：

$$R = \frac{c}{2} \Delta t = 150 \text{ 公尺} = 0.15 \text{ 公里} = 0.081 \text{ 海里} = 0.093 \text{ 英里} = 164 \text{ 码} = 492 \text{ 英尺}$$

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。由天线波束的指向可确定目标的方向，这是角坐标测量的基本原理，天线指向实际也是辐射波前的方向。

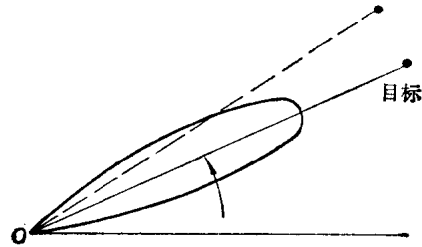


图 1.4 角坐标测量的原理图

角坐标的单位通常用弧度、度或密位表示。将圆周分为 6000 等分，每 1 等分称为 1 密位，因此 1 周等于 6000 密位。它们之间的换算关系如下：

$$1 \text{ 弧度} = 57^\circ, \quad 1^\circ = 16.7 \text{ 密位}, \quad 1 \text{ 密位} = 0.06^\circ$$

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普勒频移，它的数值为：

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

式中 f_d ——多普勒频移（赫）；

v_r ——雷达与目标之间的径向速度（米/秒）；

λ ——载波波长（米）。

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普勒频移 f_d ，就可以确定目标与雷达站之间的相对速度。

§ 1.3 脉冲雷达的基本组成

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，二次反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，以进行对目标的观测。

发射机一般有两种工作方式，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、大功率三、四极管振荡器等）。在定时器送来的触发脉冲作用下，形成调制脉冲，由调制脉冲作用在大功率振荡器上，使之产生高频大功率的脉冲。这种方式称为

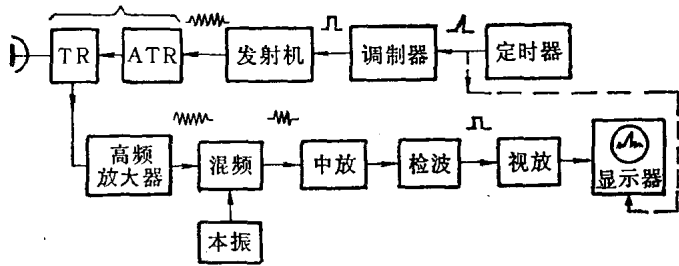


图1.5 脉冲雷达的简单方框图

功率振荡式（或单级振荡式）。另一种是以功率放大器作为发射机的末级，在调制器中已形成了高频脉冲串信号，发射机中将此脉冲串有步骤地进行功率放大，直到最末一级的高功率放大器形成了大功率高频脉冲发射波。这种方式称为功率放大式（或主振放大式）。

脉冲雷达天线一般具有强的方向性。天线的方向性越强，雷达测向的精度和分辨力越高。天线控制设备控制天线进行扫描，它和终端设备等都由定时器加以同步控制，由此可在终端设备中得到天线指向角度的录取。天线控制器是自动控制装置，一般是机电传动，新型雷达多采用液压传动或数字化传动。天线控制系统的性能直接影响雷达的测向精度和灵活性。

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频混频部分烧毁；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，一般接收机中也进行一部分信号处理，例如对噪声干扰的滤波，对多普勒速度和距离的跟踪等。

终端设备完成对信号的处理，并将雷达的输出转换成观察者所要求的形式。近代雷达一般采用数字式信号处理方式，它的终端设备就是专用的电子计算机或通用的电子计算机，最后输出以数码或符号显示，如图 1.6 所示。而普通雷达的终端设备就是显示器。

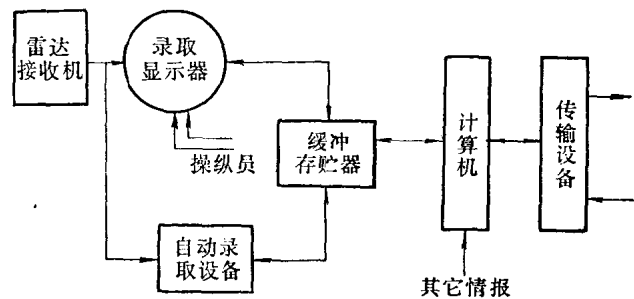


图1.6 雷达数字终端设备的组成方框图

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，由它产生所需的各种频率的振荡波，相互之间保持严格的相位关系。

§ 1.4 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 25~70000 兆赫；但超视距雷达工作频率范围则为 3~60 兆赫。

雷达的工作频率和整个电磁波频谱示于图 1.7，实际上极大部分雷达工作于 200 兆赫至 10000 兆赫频段。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，但这个频段在图 1.7 中没有表示出来。

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。表 1.1 列出雷达频段和频率对应的关系：

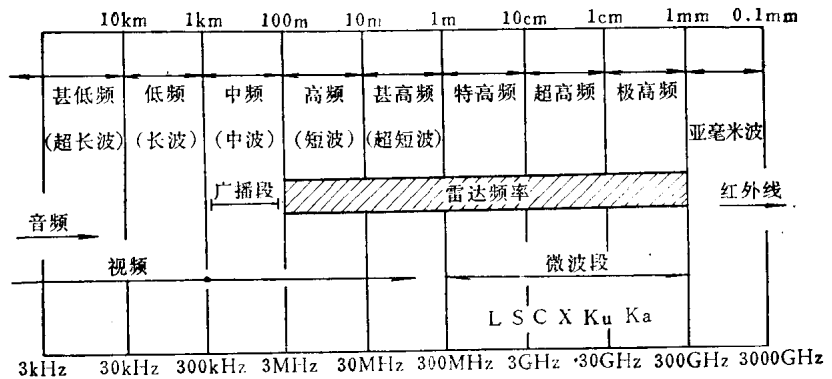


图1.7 雷达频率和电磁波频谱

表1.1 雷达频段和对应的频率

频段名称	频率
UHF波段	300~1000兆赫
L 波段	1000~2000兆赫
S 波段	2000~4000兆赫
C 波段	4000~8000兆赫
X 波段	8000~12500兆赫
Ku 波段	12.5~18兆赫
K 波段	18~26.5兆赫
Ka 波段	26.5~40兆赫

表 1.1 的频段有时以波长来表示，如 L 波段代表以 22 厘米为中心的 20~25 厘米（S 代表 10 厘米为中心，相应地 C 代表 5 厘米、X 代表 3 厘米、Ku 代表 2.2 厘米、Ka 代表 8 毫米等）。七十年代以后，国外对军用雷达波段按波长从长到短以字母顺序排列（从 A 一直排到 M）来表示，各个波段范围也作了较合理的调整。

雷达工作频率的选择，要考虑到其发射功率管的功率容量是否足够地大，接收机的噪声系数大小以及频段内的大气传播衰减大小如何等问题。还要考虑同样尺寸的天线，波长愈短，天线增益愈高，天线方向性愈好，从而能获得良好的测角精度。在第二次世界大战中，由于出现了大功率微波磁控管，所用频率进入了微波波段（一般是从 L 到 X 波段）。近数十年来因为出现了微波大功率速调管、行波管、返波管和泊管等，因此目前极大多数的近代雷达

也是工作在微波波段的。总的说来,雷达工作频率的选择是一个考虑多种因素的复杂问题。

§ 1.5 雷达的用途和分类

雷达分类的方法很多,有的按照雷达的战术用途来分类;有的按照所采用体制和特殊技术来分类,以及按照雷达的工作频段来分类等等。

1.5.1 按用途分类

根据用途分类可分军用和民用,军用雷达按战术来分又可分为下列主要类型(其中无线电测高仪和气象雷达等亦可作为民用雷达)。

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。目前的趋势是应用预警雷达不但能发现导弹,而且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普勒体制的研制成功,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) 炮瞄雷达 其任务是控制火炮对目标进行自动跟踪,因此要求它能够连续而准确地测定目标的坐标,并迅速地将数据传递给火炮。这类雷达的作用距离较小,只有几十公里,但测量的精度要求很高。目前炮瞄雷达向控制小口径高炮发展,而且作用距离只要求在二十公里左右,有的甚至只有七至八公里。

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 ~ 20 公里。

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 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 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，这种雷达要求分辨率较高。

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** 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** 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。

10) **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。

11) **航行管制雷达** 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。

其它，还有各种专门用途的雷达，这里不再举例。

1.5.2 按照雷达信号的形式分类

1) **脉冲雷达** 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** 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** 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° 和 180° 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。

此外还有脉冲多普勒雷达、噪声雷达、频率捷变雷达等。

1.5.3 其它分类

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。

相控阵雷达是一种多功能高性能的新型雷达。其天线是由许多天线单元排成阵列的。通常，天线阵元少的有几百，多则可达几千，甚至有的上万。并利用电子计算机按一定的程序来控制天线阵的移相器，从而改变阵面上的相位分布，促使波束在空间按一定规则扫描，因此称为相控阵雷达。它是雷达信号理论、信号处理技术、元器件、以及与计算机技术结合后发展到高阶段的产物，是随着电子计算机和微波移相技术的发展而诞生的。相控阵雷达具有多功能、多目标、远距离、高数据率、高可靠性和高自适应能力等优点，因而是一种很重要的雷达，而且也是唯一可用于对付高动态性能多目标的战略防空雷达，目前由地面发展到机载和舰船上应用的雷达也采用相控阵体制。

目前典型的相控阵雷达用移相器控制波束的发射和接收，共有二种组成形式：一种是收发共用一个发射机和接收机；另一种是每个天线辐射阵元用一个接收机和发射功率放大器。

收发共用一个发射机（或少数几个发射机）和接收机（或少数几组接收机）的简化相控阵雷达如图 1.8 所示，有斜线的方框部分表示与一般雷达结构的不同处。计算机根据程序输入指示信号和经过数据处理后有关目标的位置坐标，计算出波束当前应采取扫描方式或指向的数据，送往控制波束程序装置，由此再控制相控阵天线中辐射阵元的相位。目标回波经过接收机，输出接收信号的模拟量，经过模-数转换后由数据处理器处理后再送往计算机，由计算机对这些数据进行平滑化，从而得出目标位置和速度外推数据。

每个天线辐射阵元用一个接收机和发射功率放大器的简化相控阵雷达如图 1.9 所示。这种结构的特点是备有与天线辐射阵元一样多的微波收发组件，目前的发展趋势是采用微波固体电路。除个别高频器件及高压管和显示管外，有的已开始作到全部固体化，例如已制成全固体化的机载和导弹寻的装置的相控阵雷达。

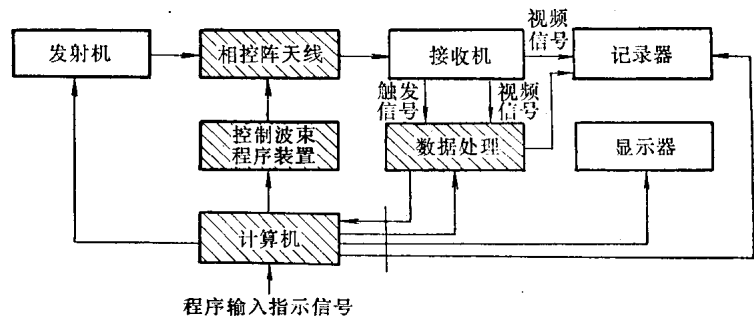


图 1.8 收发共用一个发射机、接收机的简化相控阵雷达方框图

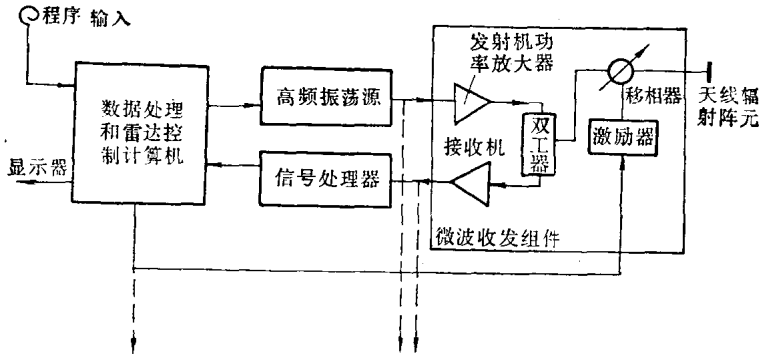


图1.9 每个天线元用一个接收机和发射功率放大器的简化相控阵雷达方框图

§ 1.6 雷达的战术参数和技术参数

雷达的性能可分为战术性能和技术性能两大方面，战术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

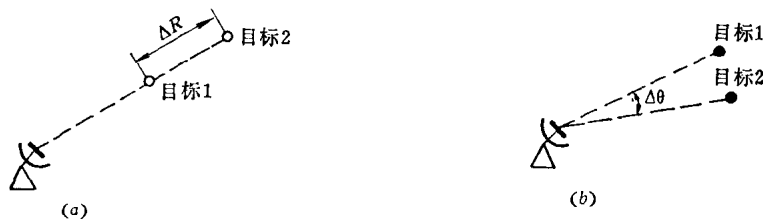


图1.10 雷达分辨力
(a) 距离分辨力；(b) 角度分辨力。

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 ΔR ，如图 1.10 (a) 所示，如果两个点目标的距离小于 ΔR ，那么它们的回波在显示器上或其他终端显示设备上就重迭在一起，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 1.10 (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。

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;其中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。

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,也影响其速度分辨力。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几十度范围内,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%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。

§ 1.7 雷达技术发展的阶段及动向

雷达技术的发展大致分为三个阶段:第一阶段是第二次世界大战开始前后的早期雷达;第二阶段是第二次世界大战末期到五十年代前以微波雷达为主要特征的时期;第三阶段自五十年代开始到目前雷达技术蓬勃发展的时期。

在第一阶段最早投入使用的是英国用来探测德国入侵飞机的 CH 系统,工作频率是 22 ~ 28 兆赫的短波,作用距离约 160 公里,探测高度为 5000 米以下的飞机。在二次世界大战中美国、德国、日本也生产了短波和超短波的雷达,但工作频率后来提高到 100 兆赫左右,采用三极管和四极管作为发射机的功率放大,作用距离在 150 ~ 200 公里左右,测距误差为几公里,方位测角误差在 4° 左右。这些雷达结构比较简单,主要作为警戒用。

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。磁控管发射机的输出峰值功率可达数百千瓦,再加上口径为数十倍波长的抛物反射面天线后,使雷达作用距离增至数百公里;采用微波天线的窄波束测角,使测高精度提高了一个数量级以上,达到了 1 ~ 2 密位;坐标的测量由距离、方位延伸到距离、方位和仰角三者;雷达的用途也得到扩大,由单纯的对目标定位,到武器的引导和控制。微波雷达具有许多优点,如测量精度有所提高;设备体积和重量减少;使用灵活轻便,不但可装备在地面上,而且也可装备在舰艇和飞机上,天线轻小后还可使整个雷达装置在汽车上,使雷达机动性能大为提高。例如那时美国生产的 10 厘米的 SCR-584 炮瞄雷达,整部雷达和天线装置在一个车辆上,使高射炮火命中率提高了十倍。在二次大战由于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。

从五十年代末以来,由于航空与航天技术的飞速发展,飞机、导弹、人造卫星及宇宙飞船等采用雷达作为探测和控制的手段,尤其是在六十年代中研制的反洲际弹道导弹系统,对雷达提出了高精度、远距离、高分辨力及多目标测量等要求。在过去二十多年中,由于解决了一系列的关键性问题,雷达进入蓬勃发展的第三阶段。如脉冲压缩技术的采用;单脉冲雷达的研制成功;微波高功率管试制的成功,研制了主振荡器——功率放大器型的高功率、高稳定度的雷达发射机,可用于可控脉冲形状及相干雷达体系;脉冲多普勒雷达体制的研制成功,能测量目标的位置和相对运动速度,具有良好的抑制地物干扰等的的能力;相控阵雷达研制的成功;微波接收机高频系统出现许多低噪声器件,例如低噪声行波管、量子放大器、参量放大器、隧道二极管放大器等,这些管子的出现使雷达接收机灵敏度大为提高,增大了雷达作用距离;在雷达中数字电路的广泛应用和计算机与雷达的配合使用和逐步合成一体,雷达的结构组成和设计将会发生根本性的变化。雷达采用这些重大技术后,工作性能大为提高,测高精度从 1 密位以上提高到 0.05 密位以下,提高了一个数量级以上。雷达的作用距离提高到数千公里,测距误差在 5 米左右,单脉冲雷达跟踪带有信标

机的飞行器，作用距离可达数十万公里以上。雷达的工作波长，从短波扩展至毫米波、红外线和紫外线领域。在这个时期中，微波全息雷达、毫米波雷达、激光雷达和超视距雷达相继出现。

雷达未来发展动向大致主要有几个方面：相控阵技术进一步发展；广泛采用数字技术及电子计算机；向自适应控制和自适应抗干扰方面发展；此外还有增强雷达抗核爆炸和核辐射的能力、雷达的小型化、提高雷达的可靠性和维护性等问题。

相控阵技术不仅应用在大型雷达中，而且也在小型的地面和舰艇、机载雷达中采用。近年来发展了一种单脉冲体制与相控阵技术相结合的雷达，因而增大了单脉冲雷达的作用空域，提高了单脉冲捕获目标的概率。原采用的平面相控阵雷达不能实现半球扫描，将光学透镜原理应用于微波领域，正在研制中的有圆顶天线，从而可使相控阵波束能作半球扫描覆盖。采用相控阵技术作仰角扫描，而在方位角采用机械转动的混合式波束扫描系统，将在许多新型雷达取代现有机械扫描雷达的趋势。相控阵雷达继续向大功率大孔径方向发展，将向数千兆瓦-数万平方米方向发展，它将对增加作用空域、提高精度及抗干扰都是有利的。

计算机广泛采用的发展趋势是微处理机的应用。雷达设备将采用多个微处理机工作，在主计算机的控制管理下，担任波束控制、信息和数据处理、自动监测和测试等任务。此外，巨型计算机亦将进入雷达系统，使更宽频带、更高频率、更复杂的雷达信号采用大型高速计算机处理，中小型雷达将成为大型雷达的卫星站，并在大型雷达计算机控制管理下遥控工作和无人值守。

数字电路和计算机在自动目标检测、动目标选择、可控的发射信号、雷达接收信号的处理、雷达的数据处理、天线波束控制、显示控制、目标识别及雷达系统工作自动化方面将获得更广泛的应用。雷达进一步采用数字计算技术后，工作灵活、功能增多、自动化及自适应性增强、将成为具有“电脑”的智能系统，雷达的面貌将大为改观。目前已出现计算机化的雷达，有可能将逐步替代现有的军用雷达。

雷达与计算机结合后，必然向自适应方向发展，根据工作的需要，对发射波束、脉冲功率、重复频率和脉冲宽度、甚至包括工作频率适当地进行改变。计算机技术应用于雷达的抗干扰系统，使雷达能自动测定干扰源、识别干扰信号特性以及选择抗干扰最佳方案。例如采用旁瓣对消来抗干扰；改变波瓣形状以零值对准干扰源；对威胁程度大的目标采用波束强功率进行干扰；此外还有改变雷达工作参数，采用频率捷变等工作方式。在复杂的干扰条件下，用计算机控制和改变雷达系统的技术参数，以便得到最佳抗干扰性能，这是近代雷达抗干扰技术中重要的特点。

主要参考资料

- 〔1〕《雷达技术》，上册，西北电讯工程学院，1975年。
- 〔2〕M. I. Skolnik "Radar Handbook", chapter 1. McGraw-Hill, Inc. 1970.
- 〔3〕《雷达原理》(上册)，成都电讯工程学院，1976年。
- 〔4〕《雷达原理》上册，北京工业学院，1974年。

第二章 雷达发射机

§ 2.1 雷达发射机的任务和基本组成

雷达是利用物体反射电磁波的特性来发现目标并确定目标的距离、方位、高度和速度等参数的。因此，雷达的工作要求发射一种特定的大功率无线电信号。发射机在雷达中就是起这一作用的，也就是说它是为雷达提供一个载波受到调制的大功率射频信号，经馈线和收发开关由天线辐射出去。

第一章已提到雷达发射机有单级振荡式和主振放大式两类。

单级振荡式发射机比较简单。如图 2.1 所示，它所提供的大功率射频信号是直接由一级大功率振荡器产生的。它受脉冲调制器的控制，因此振荡器输出的是受到调制的大功率射频信号。例如一般的常规脉冲雷达要求的是包络为矩形脉冲列的大功率射频信号，所以控制振荡器工作的脉冲调制器的输出也就是一个矩形的视频脉冲列。

主振放大式发射机的组成见图 2.2。它的特点是由多级组成。从各级功能来看，一是

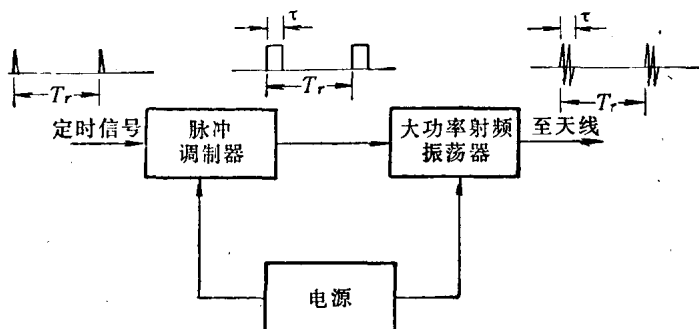


图 2.1 单级振荡式发射机

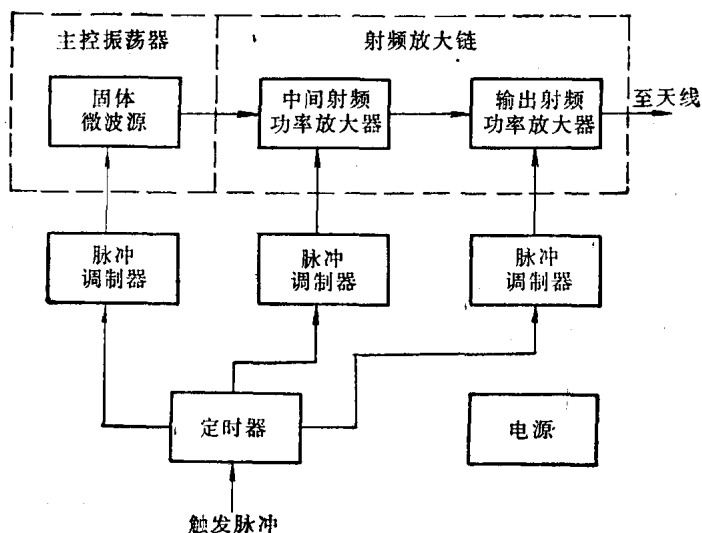


图 2.2 主振放大式发射机

用来产生射频信号，称为主控振荡器；一是放大射频信号，即提高信号的功率电平，称为射频放大链。主振放大式的名称就是由此而来。图 2.2 中用固体微波源代表主控振荡器的作用，因为现代雷达要求射频信号的频率很稳定，用简单一级振荡器很难完成，所以起到主控振荡器作用的固体微波源往往是一个比较复杂的系统。例如它先在较低的频率上利用石英晶体振荡器产生频率很稳定的连续波振荡，然后再经过若干级倍频器升高到微波波段，如果发射的信号要求某种形式的调制（例如线性调频），那末还可以把它和从波形发生器来的已经调制好的中频信号进行上变频合成。由于振荡器、倍频器及上变频器等都是由固体器件组成，所以叫固体微波源。射频放大链一般由二至三级射频功率放大器级联组成，对于脉冲雷达而言，各级功率放大器都要受到各自的脉冲调制器的控制，并且还要有定时器协调它们的工作。

单级振荡式发射机与主振放大式发射机相比最大的优点是简单、经济，也比较轻便。实践表明，同样的功率电平，单级振荡式发射机大约只有主振放大式重量的三分之一。因此，只要有可能，还是尽量优先采用单级振荡式方案。但是，当整机对发射机有较高要求时，单级振荡式发射机往往无法满足而必须采用主振放大式发射机。这个问题我们留待讨论了发射机的主要质量指标之后再研究。

§ 2.2 雷达发射机的主要质量指标

根据雷达的用途不同，对发射机需提出一些具体的技术要求，也就是要为发射机规定一些主要的质量指标。发射机的具体组成和对各部分的要求都应该从这些质量指标出发进行设计。下面将发射机的主要质量指标的意义及其与发射机各部分的关系作简单介绍。

1. 工作频率或波段

上一章已经说明，雷达的工作频率或波段是按照雷达的用途确定的，为了提高雷达系统的工作性能和抗干扰能力，有时还要求它能在几个频率上跳变工作或同时工作。工作频率或波段的对发射机的设计影响很大，它首先牵涉到发射管种类的选择，例如目前在 1000 兆赫以下主要采用微波三、四极管，在 1000 兆赫以上则有多腔磁控管、大功率速调管、行波管以及前向波管等。目前各类发射管所能提供的射频功率与带宽能力如图 2.3 所示。图 2.3(a) 和 (c) 中对每类管子均有两条曲线，它表示各类管子平均功率和带宽能力的上限和下限，但在峰值功率较大时只有行波速调管才具有上限曲线的带宽。图 2.3(b) 中 PF^2 表示峰值功率 P 与频率平方 F^2 的乘积，该虚线表示 PF^2 的边界。由该线可知，当 F 增加 10 倍时，功率相应要降低 100 倍。十分明显，发射管种类不同将影响调制器与电源的设计。

2. 输出功率

发射机的输出功率直接影响雷达的威力和抗干扰能力，所以很重要。通常规定发射机送至天线输入端的功率为发射机的输出功率。有时为了测量方便，也可以规定在指定负载上（馈线上一定的电压驻波比）的功率为发射机的输出功率。如果是波段工作的发射机还应规定在整个波段中输出功率的最低值，或者规定在波段内输出功率的变化不得大于多少分贝。

脉冲雷达发射机的输出功率又可分为峰值功率 P_p 和平均功率 P_{av} 。 P_p 是指脉冲期间

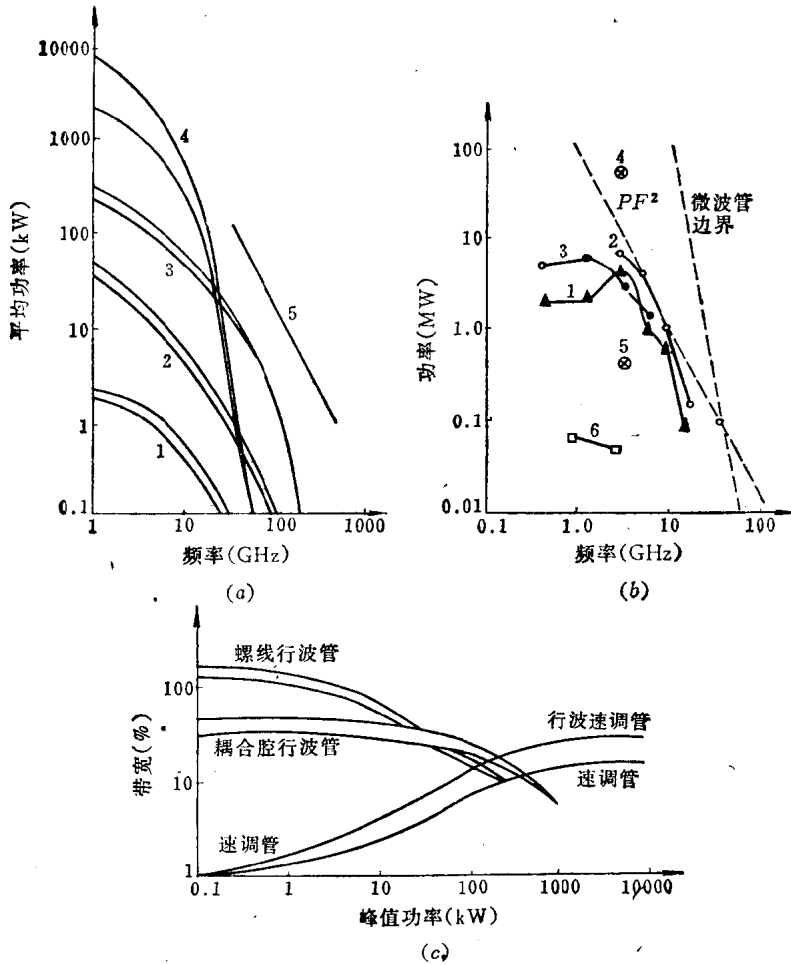


图2.3 微波发射管功率与带宽能力现状

(a) O型管的功率现状

1—周期永磁螺线行波管；2—周期永磁耦合腔行波管；3—耦合腔行波管；
4—速调管与行波速调管；5—回旋管

(b) M型管的功率现状

1—磁控管；2—同轴磁控管；3—前向波管；4—脉冲前向波管；5—连续前向波管；6—连续磁控管；

(c) O型管的带宽能力

射频振荡的平均功率（注意不要与射频正弦振荡的最大瞬时功率相混淆）。 P_{av} 是指脉冲重复周期内输出功率的平均值。如果发射波形是简单的矩形脉冲列，脉冲宽度为 τ ，脉冲重复周期为 T_r ，则有

$$P_{av} = P_r \frac{\tau}{T_r} = P_r D$$

1991.2.18

式中 $f_r = \frac{1}{T_r}$ 是脉冲重复频率。称作雷达的工作比 D 。常规的脉冲雷达工作比的典型值为 $D = 0.001$ ，但脉冲多普勒雷达的工作比可达百分之几，甚至达百分之几十；显然，连续波雷达的 $D = 1$ 。

单级振荡式发射机的输出功率决定于振荡管的功率容量。主振放大式发射机则决定于输出级（末级）发射管的功率容量。考虑到耐压和高功率击穿等问题，从发射机的角度来

看, 宁愿提高平均功率而不希望过分增大它的峰值功率。

3. 总效率

发射机的总效率是指发射机的输出功率与它的输入总功率之比。因为发射机通常在整机中是最耗电和最需要冷却的部分, 有高的总效率, 不仅可以省电, 而且对于减轻整机的体积重量也很有意义。对于主振放大式发射机, 要提高总效率, 特别要注意改善输出级的效率。

4. 信号形式 (调制形式)

根据雷达体制的不同, 可能选用各种各样的信号形式, 常用的几种信号形式列于表 2.1。雷达信号形式的不同对发射机的射频部分和调制器的要求也各不相同。对于常规雷达的简单脉冲波形而言, 调制器主要应满足脉冲宽度、脉冲重复频率和脉冲波形 (脉冲的上升边、下降边和顶部的不稳定) 的要求, 一般困难不大。但是对于复杂调制, 射频放大器和调制器往往要采用一些特殊的措施才能满足要求。

表 2.1 雷达的常用信号形式

波 形	调 制 类 型	工作比 (%)
简单脉冲、 脉冲压缩	矩形振幅调制	0.01~1
	线性调频	0.1~10
	脉内相位编码	
高工作比多普勒 调频连续波	矩形调幅	30~50
	线性调频	100
	正弦调频	
	相位编码	
连续波		100

5. 信号的稳定度或频谱纯度

信号的稳定度是指信号的各项参数例如信号的振幅、频率 (或相位)、脉冲宽度及脉冲重复频率等是否随时间作不应有的变化。后面将会分析到, 雷达信号的任何不稳定都会给雷达整机性能带来不利的影响, 例如对动目标显示雷达, 它会造成不应有的系统对消剩余, 在脉冲压缩系统中会造成目标的距离旁瓣以及在脉冲多普勒系统中会造成假目标等。信号参数的不稳定可分为规律性的与随机性的两类, 规律性的不稳定往往是由电源滤波不善, 机械震动等原因引起的, 而随机性的不稳定则是由发射管的噪声和调制脉冲的随机起伏所引起的。

可以在时间域内或在频率域内衡量信号的不稳定。在时间域可用信号某项参数的方差来表示, 例如信号的振幅方差 σ_a^2 、相位方差 σ_ϕ^2 、定时方差 σ_t^2 及脉冲宽度方差 σ_w^2 等。对于某些雷达体制可能采用信号稳定度的频域定义较为方便。信号稳定度在频域中的表示又称为信号的频谱纯度。显然, 所谓信号的频谱纯度就是指雷达信号在应有的信号频谱之外的寄生输出。以典型的矩形调幅的射频脉冲列为例, 它的理想频谱 (振幅谱) 是以载频 f_c 为中心的包络呈辛格函数状的间隔为脉冲重复频率的梳齿状频谱, 如图 2.4 所示。实际上, 由于发射机各部分的不完善, 发射信号会在理想的梳齿状谱线之外产生寄生输出, 如图 2.5 所示。图中只画出了在主谱线周围的寄生输出, 有时在远离信号主频谱的地方也会出