

雷 达 系 统 概 论

蔡 希 尧 编 著

科 学 出 版 社

1 9 8 3

内 容 简 介

本书全面论述雷达系统的组成、基本原理和方法,特别注意介绍二十多年来雷达系统中所采用的各种新技术。

全书共十一章。第一章概述雷达系统的组成和基本工作原理。第二章讨论雷达目标的统计特性。第三章论述雷达发现目标的基本原理,除介绍传统的雷达方程及其各种形式外,着重讨论了有关发现目标的几个主要问题,如匹配滤波、信号检测和恒虚警率处理等。第四至七章论述有关雷达系统主要组成部分,包括信号的发射和接收、高频传输系统、天线和电波传播。第八章介绍目标参数的测量问题,着重介绍了测量误差的分析和测量方法,并介绍了雷达目标识别的基本原理。第九章研究信号设计和信号处理,重点论述了雷达信号理论和信号的处理问题。第十章讨论终端信息处理,除介绍一般的雷达显示器外,还讨论了雷达信号的录取和目标航迹的处理问题。最后一章介绍几种特殊的雷达体制。

本书内容全面、材料新颖、论述简明、条理清晰,基本反映了雷达系统的现状和水平。

本书可供从事电子系统工程和雷达技术的教师和科技人员阅读,也可作为高等学校电子系统专业的选修课教材。

雷 达 系 统 概 论

蔡希尧 编著

责任编辑 刘兴民

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1983年7月第 一 版 开本: 850×1168 1/32
1983年7月第一次印刷 印张: 16 7/8
印数: 0001—3,900 字数: 447,000

统一书号: 15031·498

本社书号: 3100·15-7

定价: 3.10元

HK41/12

前 言

本书论述雷达系统的基本理论与方法。雷达系统所涉及的理论与方法非常广泛，它集中了电子技术科学的许多成就。本书只对有关的主要问题，择要予以讨论，所以篇幅并不太大。它既可供从事电子系统工程和雷达技术的教师和科技人员阅读，也可作为学习电子系统工程的大学高年级学生的选修课教材。

雷达目前正经历着深刻的变革，主要表现在数字技术和数字计算机在雷达中的广泛应用、雷达波形的多样化和复杂化、频率范围的扩展、器件的更新、相扫和频扫天线越来越多的使用、自适应技术的采用、目标特征参数测量技术的研究和发展、非正弦载波雷达的出现以及新的雷达体制，如多基地雷达的发展等等。这些变革，正在以相当快的速度向前推进，使雷达的功能日益扩大和完善。本书在写作中考虑到了这些情况，并以一定的篇幅对这些发展中的问题进行了讨论。

张直中、黄为倬和楼宇希三位高级工程师对本书初稿进行了仔细审阅，提出了许多宝贵意见；全书完稿后，中国科学院学部委员毕德显教授又进行了认真审阅，对书稿作了某些订正。作者在此对他们表示深切的谢意。

限于作者水平，书中一定还会存在一些缺点和不妥之处，热情地希望读者批评和指正。

作 者

1979年6月

目 录

第一章 概述	1
1-1 引言	1
1-2 雷达的基本工作原理	2
1-3 雷达的组成	7
1-4 雷达的工作频率	10
1-5 雷达的分类	13
1-6 雷达的主要性能参数	16
第二章 雷达目标	21
2-1 目标的雷达截面积	21
2-2 简单形状的目标截面积	23
2-3 复杂目标的截面积	28
2-4 雷达杂波	32
2-5 目标截面积起伏的相关性和起伏的频谱	42
第三章 目标的发现	49
3-1 雷达方程	49
3-2 匹配滤波器	54
3-3 接收机中噪声的概率特性	60
3-4 窄频带噪声加正弦信号	66
3-5 信号检测	71
3-6 回波强度的起伏和天线波瓣的形状对检测器性能的影响	85
3-7 恒虚警率处理	91
3-8 雷达方程的其他形式	99
3-9 干扰环境中的雷达方程	102
第四章 信号的发射和接收	109
4-1 发射机和接收机的典型格式	109

4-2	雷达发射机	119
4-3	雷达接收机	136
第五章	高频传输系统	156
5-1	均匀传输线	156
5-2	波导	165
5-3	同轴线	171
5-4	带状传输线和微带线	173
5-5	微波元件	177
第六章	雷达天线	192
6-1	天线的电参数	192
6-2	天线的方向图	196
6-3	天线波瓣的空间覆盖与扫描方式	203
6-4	抛物反射面天线	207
6-5	透镜天线	221
6-6	阵列天线和相位扫描	229
6-7	频率扫描天线	248
6-8	自适应天线	251
6-9	天线的误差	266
第七章	雷达波的传播	269
7-1	雷达波在平面上的传播	269
7-2	地球弯曲的影响	276
7-3	大气对电磁波的折射	278
7-4	大气对电磁波的其他影响	283
7-5	大气对电磁波的衰减	285
第八章	目标参数的测量	290
8-1	目标参数估计的基本原理	290
8-2	参数测量的误差分析	296
8-3	距离的测量	305
8-4	角度的测量	318
8-5	高度的测量	335
8-6	速度的测量	341
8-7	关于雷达目标的识别	346

第九章 信号设计和信号处理	351
9-1 引言	351
9-2 信号的表示方法	352
9-3 模糊函数	355
9-4 几种典型波形的模糊函数	365
9-5 线性调频信号	379
9-6 编码信号	394
9-7 雷达信号的数字处理	408
9-8 关于杂波的抑制问题	419
9-9 合成孔径雷达	435
9-10 非正弦载波的雷达信号	442
第十章 终端信息处理	449
10-1 引言	449
10-2 雷达显示器	451
10-3 雷达信号的录取	467
10-4 雷达数据的格式	476
10-5 航迹处理	480
10-6 航迹的平滑与外推	491
第十一章 二次雷达、都卜勒导航雷达和多基地雷达	507
11-1 二次雷达	507
11-2 都卜勒导航雷达	523
11-3 多基地雷达	526
参考文献	532

第一章 概 述

1-1 引 言

现代雷达是多种电子设备所构成的一个整体，它利用目标对电磁波的反射、应答或自身的辐射以发现目标。利用目标对电磁波的反射而发现目标的雷达，叫做一次雷达。通过对询问信号的应答而发现目标的雷达，叫做二次雷达。利用目标自身的电磁辐射来发现目标的雷达，叫做被动雷达。一次雷达是使用最多的一种雷达，也是本书讨论的主要对象。

雷达除了能发现目标以外，还能够测量目标的座标和运动参数，识别目标的类型，对目标进行跟踪。有的雷达，随着环境和目标状态的变化，能够自动调整本身的性能参数，保持最佳的工作状态。

雷达最早出现在三十年代后期。早期的雷达，只能发现目标和测量目标的距离，所以人们把它叫做“无线电发现和测距”(Radio Detection And Ranging)。取这几个英文字的开头字母，构成“Radar”这一新词，中文用译音的办法，译成“雷达”，沿用至今。

在雷达发明以前，要观测远处目标，只能用光学仪器。光学仪器是依赖被观测目标所发出的光，或其他发光物体照射于目标而被反射的光而实现观测的，限制的条件很多。黑夜，不能利用光学仪器进行观测。白天，它的观测能力受气象状况的影响很大。就是在好天气，人的眼睛通过光学仪器能够观测的距离也是很有限的。雷达和光学仪器不同，它发射电磁波去探测目标，只要目标能够反射它所发射的电磁波，就有可能实现观测。它不管白天或黑夜，都能工作。它的作用距离远，受气象条件的影响不

很大，这些都是它的突出优点。

雷达发明以后不久，就发生了第二次世界大战。由于雷达所具有的特点在军事上特别有用，所以在第二次世界大战期间，雷达得到了迅速的发展，成为很重要的军事装备。第二次世界大战以后，雷达在理论上和技术上不断地得到提高，有所创新，性能更加完善，应用日益广泛。在现代战争中，可以说几乎所有的新式武器都是利用雷达来实现控制的。在民用和科学研究方面，例如空中交通管制、气象观测、射电天文、地形测绘、卫星跟踪等，也广泛地使用了雷达。

雷达是现代电子技术的综合，在一本书中，很难从各个方面详细地加以论述。本书将以一次雷达为主要对象，侧重于在基本理论和技术方面叙述雷达的工作原理和实现方法。

1-2 雷达的基本工作原理

雷达最基本的功能是发现目标，测量目标的座标。为了把有关雷达的基本理论和技术展开讨论，先得简要地说明雷达是怎样发现目标，根据什么来测量目标的座标的。

图 1-2-1 是雷达的基本组成框图，包括三个部分：发射机、接收机和天线。图（a）是发射天线和接收天线分开的一种结构形式。发射机用以产生一定形式的高频能量，经发射天线把能量辐射到空间。当电磁波在空间传播时遇到目标，一小部分高频能量被目标反射回来，到达接收天线，进入接收机。观测人员可以通过接收机的输出来判断目标是否存在。实际使用的雷达，大多是按一定的周期重复地发射脉冲形式的高频能量，脉冲的宽度 τ 和重复周期 T ，相比是很短的，如图 1-2-2 所示。可以设法在发射机工作时，接收机关闭；发射机停止工作时，接收机打开，这样，可以省去一个天线，只用一个天线担负发射和接收的任务，如图 1-2-1（b）所示。图（a）和图（b）的结构虽然有所不

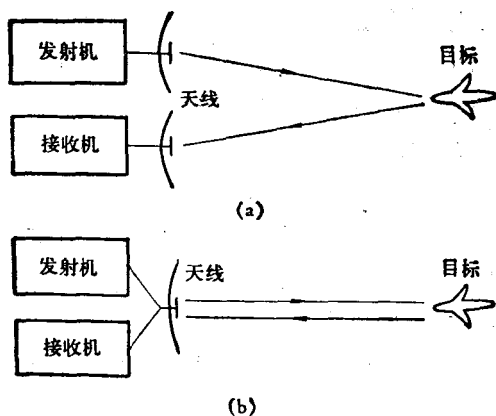


图1-2-1 雷达的基本组成框图

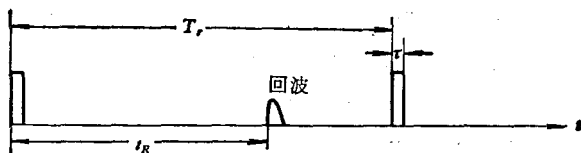


图1-2-2 脉冲雷达的时间关系

同，但工作原理却是一样的。

电磁波在空间传播，当传播的介质是均匀的时候，它的传播速度是一常数，传播的路径是一直线，利用这两个特点，可以测量目标的距离。

设 R 是雷达站到目标的直线距离。电磁波离开天线到达目标，被目标反射又回到天线，所用的时间为 t_R ，那么，在 t_R 这段时间内，电磁波所走的距离是 $2R$ 。用 c 代表电磁波在自由空间传播的速度， $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。电磁波在空气中的传播速度和在自由空间的传播速度是很接近的，因此，我们可以认为 $2R = ct_R$ ，于是得到

$$R = \frac{1}{2} ct_R, \quad (1-2-1)$$

这是雷达测量目标距离的基本公式。

从 (1-2-1) 式知道, 只要测出时间 t_R , 就可以计算出目标的距离。用电子的方法, 很容易测量 t_R , 例如用一个计数器, 在雷达发射脉冲时开始计数, 接收到目标回波时立即读出所计的数, 就能得到 t_R 的值。

脉冲雷达发射电磁波, 是按重复周期 T_r 反复进行的。当 $t_R < T_r$ 时, t_R 的测量是直接的, 不会引起别的问题。如果 $t_R > T_r$, 那么回波信号将出现在第二个发射脉冲之后, 或者在更多个发射脉冲之后。这样, 测量 t_R 的值将产生混淆的现象。所以, 通常的脉冲雷达, 重复周期 T_r 与雷达的最大作用距离 $R_{\max}$ 要满足以下的关系:

$$R_{\max} \leq \frac{1}{2} c T_r, \quad (1-2-2)$$

这就保证了 $t_R < T_r$ 。但有的雷达, 为了达到其他的目的, $R_{\max}$ 和 T_r 不服从 (1-2-2) 式所规定的关系, 允许 $t_R > T_r$, 这就要采用特殊的方法来解决测距的模糊问题。如何解决, 将在以后讨论。

雷达对目标角坐标的测量, 是利用天线的方向性来实现的。

图 1-2-3 画了一种常见的天线方向图, 它的形状象一花瓣, 所以叫它为波瓣, 或叫波束。它有一对称的轴, 沿轴的方向辐射最强, 因此, 当目标正好处在这一轴线上时, 它从雷达接收到的能量最大, 反射回来的回波也最强, 图中的目标 2 就处在这样的

位置上。目标 1 则不然, 它的角位置偏离了波瓣的轴线, 接收到的雷达照射能量较少, 回波也就比较弱。如果目标偏离波瓣的轴线更远, 就不能收到雷达的照射能量了。所以, 利用这样的天线方向图, 让它在雷达所搜索的空间按一定的规律运动, 同时观察接收机输出的回波强度。显然, 只有当天

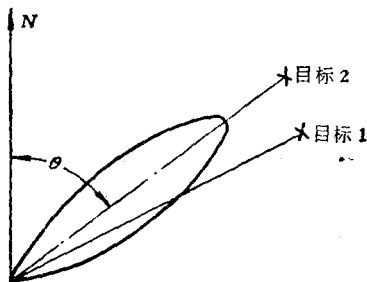


图 1-2-3 目标角坐标测量的原理

线方向图的轴线对准目标时，回波才最强，在其他的角位置上，目标的回波最弱，或者消失，这样就可以确定目标的角位置。无论是测量方位角还是仰角，都可以用这一方法。当然，天线的方向图还有其他的形状，测量角位置也还有其他的方法，以后将会详细地讨论这些问题。

角度的单位在雷达中通常用度，即圆周的 $1/360$ 。有时也用密位做角的测量单位，一密位是圆周的 $1/6000$ 。所以 $1^\circ = 16.7$ 密位， 1 密位 $= 0.06^\circ$ 。

除了距离和角度以外，雷达还能够直接测量目标的径向速度，这是利用一种物理现象，即都卜勒效应来完成的。

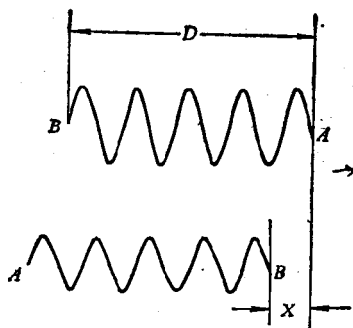


图1-2-4 都卜勒频率的推导

当一个频率为 f_0 的振荡源与一个接收这一振荡的物体之间有相对运动时，这个物体接收到的振荡频率将不是 f_0 ，而是另外的值 f 。当物体与振荡源互相接近时， $f > f_0$ ；当物体与振荡源远离时， $f < f_0$ 。这种现象，就叫做都卜勒效应。

设雷达发射的一段正弦振荡如图 1-2-4 所示，从 A 到 B ，在空间延伸的长度为 D ，频率是 f_0 ，则波长为

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0}, \quad (1-2-3)$$

式中 $c = 3 \times 10^8$ m/s，是电磁波在自由空间传播的速度。在长度 D 之中，所包括的振荡周期的数目是

$$n = \frac{D}{\lambda_0} = \frac{Df_0}{c}. \quad (1-2-4)$$

这段正弦波自左向右传播时遇到了目标，首先是 A 点与目标接触并被反射回来；最后是 B 点与目标接触，也被反射回来。如果目标和雷达站之间有相对运动，以径向速度 v ，向着雷达站飞行，则

• • •

AB 这一段正弦波被目标反射时, 目标与正弦波相接触的持续时间将是 $D/(c+v_r)$ 秒。在 A 点接触目标并被反射到 B 点接触目标也被反射这段时间内, 目标向着雷达站前进了一段距离, 它是 $v_r D/(c+v_r)$ 。因此, B 点被目标反射回到雷达站所走的距离, 将比 A 点被目标反射回到雷达站所走的距离要短一点, 两者的差值就是目标前进的距离 $v_r D/(c+v_r)$, 这一距离所对应的电磁波的传播时间是 $v_r D/(c+v_r) \cdot c$ 。雷达所收到的目标回波仍然是 AB 这段正弦波, 但是接收的持续时间将不是 $D/(c+v_r)$, 而要短一点, 用 Δt 表示接收的持续时间, 则

$$\Delta t = \frac{D}{c+v_r} - \frac{v_r D}{(c+v_r)c} = \frac{D}{c} \frac{c-v_r}{c+v_r}, \quad (1-2-5)$$

但是, 回波信号在 A 和 B 之间的振荡周期数是不变的, 仍然为 n 。由于持续时间起了变化, 这样, 回波的频率 f 将不再是 f_0 , 而是一个新的值, 它和 Δt 及 n 之间的关系是

$$n = \Delta t \cdot f, \quad (1-2-6)$$

将 (1-2-5) 式的 Δt 代入, 得

$$n = \frac{D}{c} \frac{c-v_r}{c+v_r} f, \quad (1-2-7)$$

但 n 可以表示为 (1-2-4) 式, 代入 (1-2-7) 式, 得

$$\frac{D}{c} f_0 = \frac{D}{c} \frac{c-v_r}{c+v_r} f,$$

从而可以求出 f 和 f_0 的关系:

$$f = f_0 \frac{c+v_r}{c-v_r}. \quad (1-2-8)$$

在这个式子中, c 是一常数, 所以回波信号的频率 f 决定于发射频率 f_0 和目标的径向相对速度 v_r 。当 $v_r = 0$ 时, $f = f_0$, 这说明目标与雷达站之间没有径向相对运动时, 回波信号的频率就等于发射信号的频率。目标与雷达站相接近时, $v_r > 0$, $f > f_0$ 。 f 与 f_0 之间的差值, 就叫做都卜勒频率, 用 f_d 表示, 则

$$f_d = f - f_0 = f_0 \frac{2v_r}{c-v_r}. \quad (1-2-9)$$

在实际的情况下, $v_r \ll c$, 因此

$$f_d \approx f_0 \frac{2v_r}{c} = \frac{2v_r}{\lambda_0}. \quad (1-2-10)$$

当目标运动的方向是离开雷达站时, 可以用 $(-v_r)$ 代替以上各式中的 v_r , 得到

$$f = f_0 \frac{c - v_r}{c + v_r}. \quad (1-2-11)$$

这时, $f < f_0$, 二者之差为

$$f_d = f_0 - f = f_0 \frac{2v_r}{c + v_r}, \quad (1-2-12)$$

考虑到 $v_r \ll c$, 将得到与 (1-2-10) 式相同的结果。

根据以上的分析, 我们可以知道, 只要测出回波信号的频率和发射信号频率之间的差值 f_d , 就可以求出目标的径向速度 v_r ,

$$v_r = \frac{c}{2} \frac{f_d}{f_0} = \frac{1}{2} \lambda_0 f_d. \quad (1-2-13)$$

如果能够确定 f 和 f_0 的大小, 那么, 当 $f > f_0$ 时, 目标是朝着雷达站飞行的; $f < f_0$ 时, 目标离开雷达站飞行。如果运动的目标没有径向速度分量, 那就没有都卜勒效应, 不能用这个办法测量它的运动速度。

1-3 雷达的组成

在上一节中, 已经给出一个由发射机、接收机和天线所组成的最简单的框图。实际的雷达还包括一些其他的部分, 现在以脉冲雷达为例来说明。

图 1-3-1 是脉冲雷达的组成框图, 它的各个部分的工作关系和工作情况是这样的: 定时器管理整个雷达的时序关系, 它产生重复频率一定的脉冲, 一方面送给调制器, 另一方面送给显示器, 启动这两个部件的工作。调制器受到定时器的触发以后, 产生一个功率强大的矩形脉冲, 它的宽度通常处在微秒量级, 用这个脉冲去调制发射机, 使发射机输出一个包络与调制波形相同的高频

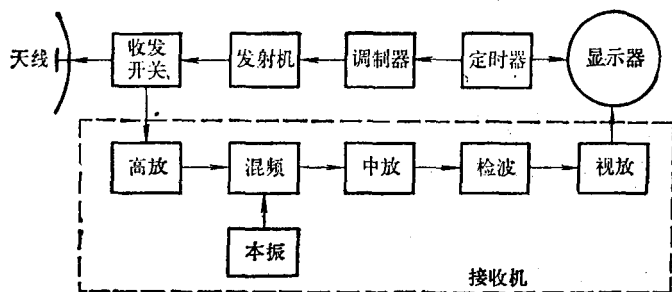


图1-3-1 脉冲雷达的组成

振荡，高频脉冲功率为兆瓦数量级。发射脉冲通过收发开关到达天线，以电磁波的形式把高频能量辐射到空间。收发开关是发射机和接收机之间的隔离元件。当发射机工作时，它使天线与接收机断开，而与发射机接通，这样，发射机的功率可以送到天线上，而又不致于损坏接收机。发射机工作结束后，收发开关把天线与发射机断开，而和接收机接通，使接收机处于随时可以接收目标回波的状态。有了这个收发开关，脉冲雷达可以只用一个天线，兼做发射和接收。在方框图的下面是接收机，它的各个组成部分已分别画出来。目标的回波信号通过天线和收发开关，首先到达接收机的高频放大器，它把接收到的微弱信号放大以后，同本机振荡器所产生的高频信号一起加到混频器上去。本机振荡器产生的高频信号的频率，和发射信号的频率是不一样的，它们的差等于中频。因此，混频器的输出是中频信号。在高频放大信号比较困难，而在中频则比较容易做到，所以回波信号主要依靠中频放大器放大到足够的电平。脉冲雷达的中频通常取30MHz或60MHz，带宽则与脉冲宽度成反比，约为1MHz左右，所以中频放大器是一个窄频带放大器。信号经过中频放大以后，幅度足够大了，便加到检波器上，取出信号的包络，还原为一个脉冲，再经过视频放大，送到显示器上去。

雷达显示器是由阴极射线管做成的。显示器受到定时信号

触发后, 就开始工作。回波信号到来时, 显示器的屏幕就将显示出目标所对应的位置。最常用的雷达显示器是平面显示器, 它能够显示目标的距离和方位, 如图 1-3-2 所示。屏幕的中心代表雷达站所处的位置。目标以亮点显示出来。亮点与圆心之间的距离就是目标的距离, 它和正北方向的夹角, 以顺时针方向读出, 就是目标的方位角。在实际的平面显示器上, 距离和方位都有机械或电子的刻度, 因此, 能够直接读出目标的平面位置。

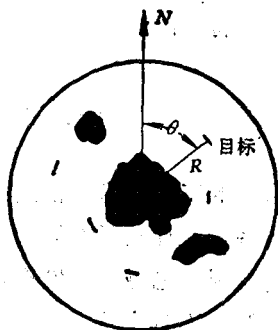


图1-3-2 平面显示器的画面

图 1-3-1 的雷达框图虽然比图 1-2-1 的框图详细一些, 但仍然是简化了的, 实际的雷达还包括其他一些附加设备, 显示器一般有好几台, 接收机可能是多路的。不过脉冲雷达的主要组成部分都已经画出来了。

图 1-3-1 所表示的雷达, 没有包括电子计算机在内, 雷达的输出设备是显示器, 使用者对显示器进行观测, 以发现目标, 读出目标的坐标。新型的雷达, 已经改变了这种状况, 电子计算机成为雷达的组成部分, 目标的发现、信号的处理和数据的处理都可以借助于电子计算机和数字技术自动地完成, 图 1-3-3 是这类

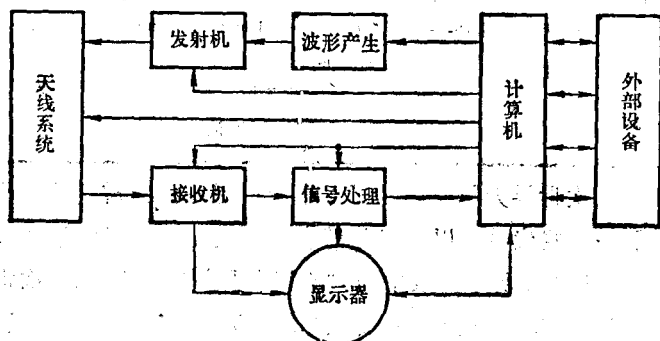


图1-3-3 带有计算机的雷达框图

雷达的简化框图。图中的计算机控制雷达各个部分的工作，包括发射机的调制波形的产生，天线方向图的形状和指向，接收机和信号处理设备的工作，以及显示器的显示内容等等。有的雷达，发射机和接收机的工作频率和发射功率，也可以接受计算机的控制。计算机还对雷达输出的数据进行实时的处理，得出雷达可能跟踪的多个目标的航迹和其他的参数。对于这类雷达的有关问题，本书将在以后各章中进行讨论。

1-4 雷达的工作频率

雷达的工作频率是雷达的重要指标。从本质上来说，雷达的工作频率没有什么严格的限制，因为任何能够检测目标所反射的或自身辐射的电磁波以发现目标并对它进行定位的设备，都可以叫做雷达，而具有这一功能设备的工作频率范围是很广的。

表1-4-1 是电磁波的频谱，在表中标出了常用雷达的工作频率范围。多数雷达工作在微波波段，少数的工作在米波波段。个别的雷达在这个范围以外。

表1-4-1 电磁波的频谱

频 率						
300kHz	3MHz	30MHz	300MHz	3GHz	30GHz	300GHz
1km	100m	10m	1m	10cm	1cm	1mm
波 长						
←——微波波段——→						
常用雷达波段						

在第二次世界大战时，为了军事上的保密，给雷达的工作频率范围取了一些代号，以后又陆续有所补充，形成了雷达频段的名称，如表1-4-2所示。表中的“原用名称”就是从第二次世界大战开始使用的，比较普遍，右边的“现用名称”是最近更改的。

表1-4-2 雷达频段的名称

原用名称	频率范围 (MHz)	现用名称	频率范围 (MHz)
HF	3—30	I	100—150
VHF	30—300	G	150—225
UHF	300—1000	P	225—390
P	230—1000	L	390—1550
L	1000—2000	S	1550—3900
S	2000—4000	C	3900—6200
C	4000—8000	X	6200—10900
X	8000—12500	K	10900—36000
Ku	12500—18000	Q	36000—46000
K	18000—26500	V	46000—56000
Ka	26500—40000		
毫米波	大于40000		

雷达的工作频率，同雷达的工作性能关系密切。当频率低于3MHz时，为中波波段，电磁波将沿着地球表面传播，不受地球曲率的限制，所以作用距离可以很远。但是，由于波长很长($\lambda > 100\text{m}$)，在这个波段要制造有方向性的天线，将会非常庞大，环境噪声的电平高，地物回波的干扰也较大，而且频谱的使用非常拥挤，所以一般的雷达不使用这个波段。

在3—30MHz，即短波波段，电磁波的传播既可以沿地面进行，也可以经过电离层反射而传播，所以用这一波段，可以发现远处的目标。这个波段有产生大功率的电子器件。英国人发明的第一个雷达，就工作在这个波段，它的频率是22—28MHz。

甚高频(VHF, 30—300MHz)是雷达可用的频率范围，第二次世界大战时使用过的一些雷达，包括警戒雷达和火炮控制雷达，曾经设计在这个波段。因为在这个波段，高频率和大功率器件比较容易解决。由于发射机和接收机在这个波段工作稳定，所以动目标显示设备的性能较好，频率低而不易出现盲速，在大气中传播的衰减较小。但是由于天线不宜过大，所以角度的分辨率不高。目前很少有新的雷达使用这个波段。