



清华大学电子与信息类系列教材

雷达原理

第三版

● 国家重点教材

● 于海宁、刘恩洪、编著



清华大学出版社

<http://www.tsinghua.com>

高等学校
电子信息类 规划教材

雷 达 原 理

(第三版)

丁鹭飞 耿富录 编著

西安电子科技大学出版社

2002

内 容 简 介

本书包括雷达分机、雷达测量方法两大部分。前者包括雷达发射机、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；后者包括雷达的测距、测角和测速的基本原理和各种实现方法，并相应地讨论了各种雷达体制的基本工作原理，如连续波、三坐标、相控阵、圆锥扫描、单脉冲和双基地等雷达。此外，还较全面地讨论了雷达方程和动目标检测(MTD)雷达。这次修订增加了第9章“高分辨力雷达”。

本教材内容较好地体现了20世纪80年代以来雷达技术的新发展。根据现代战争的需要还增加了雷达电子对抗的内容。

本书可作为电子工程等有关专业的本科生教材，也可作为雷达工程技术人员的参考书。

高等学校电子信息类规划教材

雷 达 原 理

(第三版)

丁鹭飞 耿富录 编著

责任编辑 夏大平

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)8227828 邮 编 710071

<http://www.xduph.com> E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印 刷 西安文化彩印厂

版 次 1984年11月第1版 1995年6月第2版 2002年6月第3版
2002年6月第5次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 22.625

字 数 537千字

印 数 21 001~25 000册

定 价 23.00元

ISBN 7-5606-0354-8/TN·0090(课)

XDUP 0614023-5

*** 如有印装问题可调换 ***

本书封面贴有西安电子科技大学出版社的激光防伪标志，无标志者不得销售。

前 言

本教材为全国高校电子工程专业委员会制定的“九五”全国电子信息类专业教材出版规划中推荐出版的一本修编教材。本教材是在 1995 年出版的《雷达原理(修订版)》的基础上加以修订而成的。

本教材由西安电子科技大学丁鹭飞、耿富录两位教授修编，主审为北京理工大学毛二可工程院院士，责任编委为电子科技大学陈天麒教授。

本教材的内容原为 8 章，参考学分为 3 个，此次修编根据需要增加“高分辨力雷达”一章，这部分学分为 1 个。如在“雷达原理”之后还有“雷达系统”课程，后增加的一章可以不讲。本教材适用于大学本科生或研究生。

丁鹭飞修编了第 1、5、6、7、8 章并编写了第 9 章，耿富录负责修编第 2、3、4 章。主审毛二可院士对书稿提出了许多宝贵意见，在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

2002 年 3 月

第二版(修订版)前言

本教材系按电子工业部工科电子类教材编审出版规划,由无线电技术与信息系统教材编审委员会雷达编审小组推荐,将原统编教材《雷达原理》修编出版的规划教材,责任编辑委是向敬成教授。

本教材由西安电子科技大学丁鹭飞、耿富录两位教授修编,电子科技大学张明友教授、王意清副教授担任主审。

本课程的参考教学时数为 70 学时。其主要内容分为雷达分机和雷达测量方法两部分。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(天线馈线系统因有专门课程开设,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,并相应讨论了雷达各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、双基地等。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。

本次教材修编时在内容上作了较大的更新,以尽量反映 20 世纪 80 年代以来雷达技术的新发展,此外又以一定篇幅介绍雷达电子对抗的内容及其发展动向。丁鹭飞修编了第一、第五、第六、第七、第八章,耿富录修编了第二、第三、第四章。

由于编者水平所限,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

1995 年 4 月

第一版前言

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

1984 年 9 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 雷达的任务	1
1.2 雷达的基本组成	5
1.3 雷达的工作频率	7
1.4 雷达的应用和发展	8
1.5 电子战与军用雷达的发展	13
主要参考文献	24
第 2 章 雷达发射机	25
2.1 雷达发射机的任务和基本组成	25
2.2 雷达发射机的主要质量指标	26
2.3 单级振荡和主振放大式发射机	30
2.4 固态发射机	35
2.5 脉冲调制器	43
主要参考文献	48
第 3 章 雷达接收机	49
3.1 雷达接收机的组成和主要质量指标	49
3.2 接收机的噪声系数和灵敏度	52
3.3 雷达接收机的高频部分	61
3.4 本机振荡器和自动频率控制	66
3.5 接收机的动态范围和增益控制	69
3.6 滤波和接收机带宽	73
主要参考文献	77
第 4 章 雷达终端显示器和录取设备	78
4.1 雷达终端显示器	78
4.2 距离显示器	81
4.3 平面位置显示器	86
4.4 计算机图形显示	91
4.5 雷达数据的录取	108
4.6 综合显示器简介	115
4.7 光栅扫描雷达显示器	121
主要参考文献	127
第 5 章 雷达作用距离	128
5.1 雷达方程	128
5.2 最小可检测信号	130
5.3 脉冲积累对检测性能的改善	138
5.4 目标截面积及其起伏特性	141

5.5	系统损耗	153
5.6	传播过程中各种因素的影响	156
5.7	雷达方程的几种形式	163
	主要参考文献	169
第 6 章	目标距离的测量	170
6.1	脉冲法测距	170
6.2	调频法测距	177
6.3	距离跟踪原理	184
6.4	数字式自动测距器	191
	主要参考文献	199
第 7 章	角度测量	200
7.1	概述	200
7.2	测角方法及其比较	202
7.3	天线波束的扫描方法	209
7.4	三坐标雷达	225
7.5	自动测角的原理和方法	237
	主要参考文献	249
第 8 章	运动目标检测及测速	251
8.1	多卜勒效应及其在雷达中的应用	251
8.2	动目标显示雷达的工作原理及主要组成	261
8.3	盲速、盲相的影响及其解决途径	267
8.4	回波和杂波的频谱及动目标显示滤波器	276
8.5	动目标显示雷达的工作质量及质量指标	285
8.6	动目标检测(MTD)	291
8.7	自适应动目标显示系统	299
8.8	速度测量	304
	主要参考文献	311
第 9 章	高分辨力雷达	312
9.1	高距离分辨力信号及其处理	312
9.2	合成孔径雷达(SAR)	333
9.3	逆合成孔径雷达(ISAR)	345
9.4	阵列天线的角度高分辨力	349
	主要参考文献	354

第 1 章 绪 论

1.1 雷达的任务

雷达是英文 Radar 的音译，源于 Radio Detection and Ranging 的缩写，原意是“无线电探测和测距”，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，以及从目标回波中获取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。

1.1.1 雷达回波中的可用信息

当雷达探测到目标后，就要从目标回波中提取有关信息：可对目标的距离和空间角度定位，目标位置的变化率可由其距离和角度随时间变化的规律中得到，并由此建立对目标的跟踪；雷达的测量如果能在二维或多维上有足够的分辨力，则可得到目标尺寸和形状的信息；采用不同的极化，可测量目标形状的对称性。原理上，雷达还可测定目标的表面粗糙度及介电特性等。

目标在空间、陆地或海面上的位置，可以用多种坐标系来表示。最常见的是直角坐标系，即空间任一点目标 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：

(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。

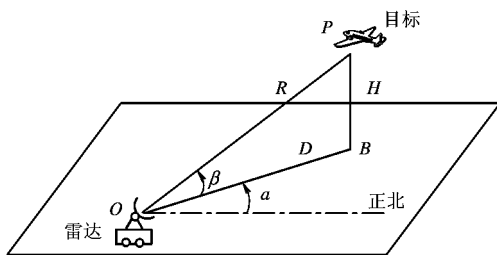


图 1.1 用极(球)坐标系表示目标位置

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 。

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，必须作适当的修改。

现以典型的单基地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框图。

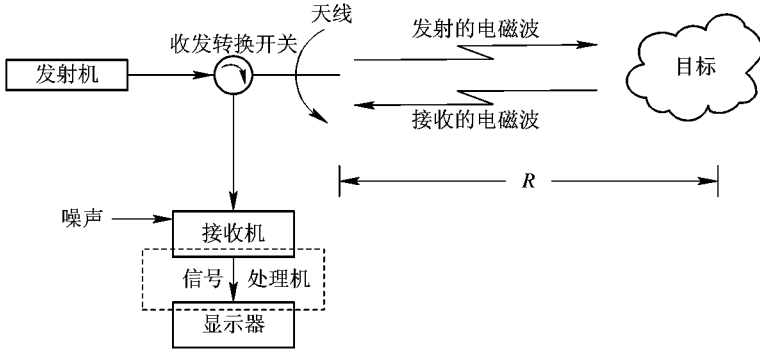


图 1.2 雷达的原理及其基本组成

由雷达发射机产生的电磁能，经收发开关后传输给天线，再由天线将此电磁能定向辐射于大气中。电磁能在大气中以光速(约 3×10^8 m/s)传播，如果目标恰好位于定向天线的波束内，则它将要截取一部分电磁能。目标将被截取的电磁能向各方向散射，其中部分散射的能量朝向雷达接收方向。雷达天线搜集到这部分散射的电磁波后，就经传输线和收发开关馈给接收机。接收机将这微弱信号放大并经信号处理后即可获取所需信息，并将结果送至终端显示。

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

$$2R = ct_r$$

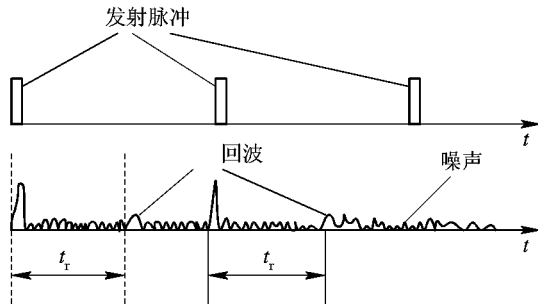


图 1.3 雷达测距

或

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

式中, R 为目标到雷达站的单程距离, 单位为 m ; t_r 为电磁波往返于目标与雷达之间的时间间隔, 单位为 s ; c 为光速, $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

由于电磁波传播的速度很快, 雷达技术常用的时间单位为 μs , 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

$$R = \frac{c}{2}t_r = 150 \text{ m} = 0.15 \text{ km}$$

能测量目标距离是雷达的一个突出优点, 测距的精度和分辨力与发射信号带宽(或处理后的脉冲宽度)有关。脉冲越窄, 性能越好。

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。当目标偏离天线波束轴时回波信号减弱, 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。

为了提高角度测量的精度, 还会有一些改进的测量方法(详见后述)。天线尺寸增加, 波束变窄, 测角精度和角分辨力会提高。

回波的波前方向(角位置)还可以用测量两个分离接收天线收到信号的相位差来决定。

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相对于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 为多卜勒频移, 单位为 Hz ; v_r 为雷达与目标之间的径向速度, 单位为 m/s ; λ 为载波波长, 单位为 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。

径向速度也可以用距离的变化率来求得, 此时精度不高但不会产生模糊。无论是用距离变化率或用多卜勒频移来测量速度, 都需要时间。观测时间愈长, 则速度测量精度愈高。

多卜勒频移除用作测速外, 更广泛的是应用于动目标显示(MTI)、脉冲多卜勒(PD)等雷达中, 以区分运动目标回波和杂波。

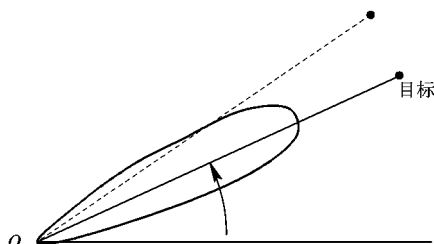


图 1.4 角坐标测量

4. 目标尺寸和形状

如果雷达测量具有足够高的分辨力,就可以提供目标尺寸的测量。由于许多目标的尺寸在数十米量级,因而分辨能力应为数米或更小。目前雷达的分辨力在距离维已能达到,但在通常作用距离下切向距离(RQ)维的分辨力还远达不到,增加天线的实际孔径来解决此问题是不现实的。然而当雷达和目标的各个部分有相对运动时,就可以利用多卜勒频率域的分辨力来获得切向距离维的分辨力。例如,装于飞机和宇宙飞船上的 SAR(综合孔径)雷达,与目标的相对运动是由雷达的运动产生的。高分辨力雷达可以获得目标在距离和切向距离方向的轮廓(雷达成像)。

此外,比较目标对不同极化波(例如正交极化等)的散射场,就可以提供目标形状不对称性的量度。复杂目标的回波振幅随着时间会变化,例如,螺旋桨的转动和喷气发动机的转动将使回波振幅的调制各具特点,可经过谱分析检测到。这些信息为目标识别提供了相应的基础。

1.1.2 雷达探测能力——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自由空间的雷达方程。

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 用来表示相对于各向同性天线,实际天线在辐射方向上功率增加的倍数。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 σ 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:

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

σ 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

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

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,这是因为许多影响作用距离的环境和实际因素在方程中没有被包括。关于雷达作用距离的深入讨论将在第 5 章展开。

1.2 雷达的基本组成

以典型单基地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、发射机、接收机、信号处理机和终端设备等组成。雷达发射机产生辐射所需强度的脉冲功率,其波形是脉冲宽度为 τ 而重复周期为 T_r 的高频脉冲串。发射机现有两种类型:一种是直接振荡式(如磁控管振荡器),它在脉冲调制器控制下产生的高频脉冲功率被直接馈送到天线;另一种是功率放大式(主振放大式),它是由高稳定度的频率源(频率综合器)作为频率基准,在低功率电平上形成所需波形的高频脉冲串作为激励信号,在发射机中予以放大并驱动末级功放而获得大的脉冲功率来馈给天线的。功率放大式发射机的优点是频率稳定度高且每次辐射是相参的,这便于对回波信号作相参处理,同时也可以产生各种所需的复杂脉压波形。

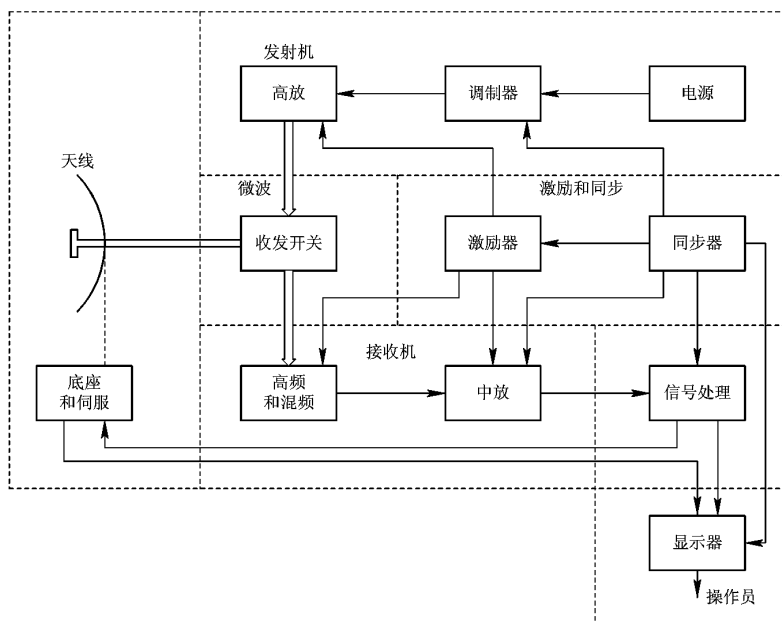


图 1.5 脉冲雷达基本组成框图

发射机输出的功率馈送到天线,而后经天线辐射到空间。

脉冲雷达天线一般具有很强的方向性,以便集中辐射能量来获得较大的观测距离。同时,天线的方向性越强,天线波瓣宽度越窄,雷达测向的精度和分辨力就越高。常用的微

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。根据雷达用途的不同，波束形状可以是扇形波束或针状波束。天线波束的空间扫描也可以采用电子控制的办法，它比机械扫描的速度快，灵活性好，这就是 20 世纪末开始日益广泛使用的平面相控阵天线和电子扫描的阵列天线。前者在方位和仰角两个角度上均实行电扫描，后者是一维电扫，另一维机械扫描。

脉冲雷达的天线是收发共用的，这需要高速开关装置，在发射时，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，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。对于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的雷达，则可以由典型接收机后接的信号处理机完成。

接收机中的检波器通常是包络检波器，它取出调制包络送到视频放大器，如果后面要作多卜勒处理，则可用相位检波器替代包络检波器。

信号处理的目的是消除不需要的信号(如杂波)及干扰而通过或加强由目标产生的回波信号。信号处理是在做出检测判决之前完成的，它通常包括动目标显示(MTI)和脉冲多卜勒雷达中的多卜勒滤波器，有时也包括复杂信号的脉冲压缩处理。

许多现代雷达在检测判决之后要进行数据处理。主要的数据处理例子是自动跟踪，而目标识别是另一个例子。性能好的雷达在信号处理中消去了不需要的杂波和干扰，而自动跟踪只需处理检测到的目标回波，输入端如有杂波剩余，可采用恒虚警(CFAR)等技术加以补救。

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这两个坐标(详见第 4 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(接收机或信号处理机输出)按距离方位分辨单元分别积累，而后经门限检测，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，最后，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。

同步设备(频率综合器)是雷达机的频率和时间标准。它产生的各种频率振荡，相互之间保持严格的相位关系，从而保证雷达全相参工作；时间标准提供统一的时钟，使雷达各分机保持同步工作。

图 1.5 所示的雷达组成框图是基本框图，不同类型的雷达还有一些补充和差别，这些问题将在以后章节中讨论。

1.3 雷达的工作频率

按照雷达的工作原理，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 220~35 000 MHz(220 MHz~35 GHz)，实际上各类雷达工作的频率在两头都超出了上述范围。例如天波超视距(OTH)雷达的工作频率为 4 MHz 或 5 MHz，而地波超视距的工作频率则低到 2 MHz。在频谱的另一端，毫米波雷达可以工作到 94 GHz，激光(Laser)雷达工作于更高的频率。工作频率不同的雷达在工程实现时差别很大。

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 200 MHz 至 10 000 MHz 频段。由于 20 世纪 70 年代已制成能产生毫米波的大功率管，毫米波雷达已获得试制和应用。

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。表 1.1 列出雷达频段和频率对应的关系。表 1.1 的频段有时以波长来表示，如 L 波段代表以

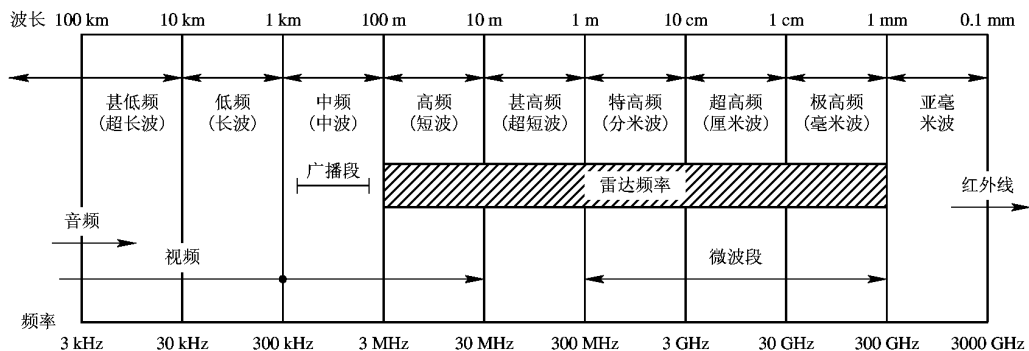


图 1.6 雷达频率和电磁波频谱

表 1.1 雷达频段和对应的频率

频段名称	频率	国际电信联盟分配的雷达频段
UHF 波段	300~1000 MHz	420~450 MHz, 890~940 MHz
L 波段	1000~2000 MHz	1215~1400 MHz
S 波段	2000~4000 MHz	2300~2500 MHz, 2700~3700 MHz
C 波段	4000~8000 MHz	5250~5925 MHz
X 波段	8000~12 000 MHz	8500~10 680 MHz
Ku 波段	12.0~18 GHz	13.4~14 GHz, 15.7~17.7 GHz
K 波段	18~27 GHz	24.05~24.25 GHz
Ka 波段	27~40 GHz	33.4~36 GHz
mm 波段	40~300 GHz	

22 cm 为中心的 20~25 cm(S 代表 10 cm 为中心, 相应地, C 代表 5 cm, X 代表 3 cm, Ku 代表 2.2 cm, Ka 代表 8 mm 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 MHz 到 2000 MHz, 而 L 波段雷达的工作频率却被约束在 1215 MHz 到 1400 MHz 的范围。

1.4 雷达的应用和发展

1.4.1 应用情况

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 20 世纪 70 年代以来, 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着日益增长的作用。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(超远程雷达) 它的主要任务是发现洲际导弹, 以便及早发出警报。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 400 km 以上, 有的可达 600 km。对于测定坐标的精确度、分辨力要求不高。对于担当保卫重点城市或建筑物任务的中程警戒雷达, 要求有方位 360° 的搜索空域。

3) 引导指挥雷达(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。

近年来由于低空和超低空袭击的威胁日益严重, 为了及早发现这类目标并采取相应对策, 可由一部机载预警雷达来完成对地面搜索和引导指挥雷达的功能。由于地面雷达低空盲区以及视距的限制, 它对低空飞行目标的探测距离很近, 而装在预警飞机上的预警雷达可以登高而远望。20 世纪 70 年代, 把具有脉冲多卜勒体制的预警雷达装于预警机上, 可以保证它能在很强的杂波背景下仍能把目标信号检测出来。20 多年来, 由于雷达技术的发展, 装置在预警机上的预警雷达同时兼有引导指挥雷达的功能, 此时预警机的作用等于把地面区域防空指挥所搬到了飞机上, 使它成为一个完整的空中预警和控制系统。这是当前一种重要的雷达类型, 目前国外一些国家已正式使用。

4) 火控雷达 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 它和火控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 这类雷达用于发现坦克、军用车辆、人和其它在战场上的运动目标。

7) 机载雷达 这类雷达除机载预警雷达外,主要有下列数种类型:

(1) 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力高。

(2) 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。

(3) 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像,以便在黑夜和暴雨、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。

(4) 机载火控雷达。20 世纪 70 年代后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,进行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 这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雷达。

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,故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。这一雷达系统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 这种雷达用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) 遥感设备 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,由于具有二维高分辨力而可对地形、地貌成像。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进行测量和地图描绘。也曾利用此类雷达来探测月亮和行星(雷达天文学)。

此外,在飞机导航,航道探测(用以保证航行安全),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,已研制出了各类雷达。例如,按照雷达信号的形式分