

雷达侦察干扰原理

上册

四〇三室 编



西北电讯工程学院

1976

毛主席语录

教育必须为无产阶级政治服务，必须同生产劳动相结合。劳动人民要知识化，知识分子要劳动化。

学生也是这样，以学为主，兼学别样，即不但学文，也要学工、学农、学军，也要批判资产阶级。学制要缩短，教育要革命，资产阶级知识分子统治我们学校的现象，再也不能继续下去了。

自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主的干工业、干农业，干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验——引以为戒，这就是我们的路线。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

前 言

遵照伟大领袖毛主席关于“**学制要缩短，教育要革命**”，“**课程设置要精简。教材要彻底改革，有的首先删繁就简**”的教导，我们编写了《雷达侦察干扰原理》这本教材，供我院雷达侦察干扰专业学习专业原理课程时的基本教材。

本书编写过程中，根据雷达侦察和干扰专业的需要，打破了这个专业过去的雷达原理、雷达侦察原理和雷达干扰原理三个原理课教材的界限，保留了所需的基本内容，并力求能反映雷达、侦察和干扰技术的新发展。

全书分上、下两册。上册包括一至七章：（一）雷达侦察干扰概述，（二）测距，（三）测向，（四）雷达自动跟踪系统，（五）雷达测速和动目标选择，（六）作用距离方程及空间能量计算，（七）对雷达方位和频率的侦察。

下册包括八至十二章：（八）雷达信号参数的分选与测量（九）干扰对雷达接收显示系统的影响，（十）干扰对雷达自动跟踪系统的影响，（十一）引导式干扰机构成原理，（十二）回答式干扰机构成原理，附录：雷达反干扰技术及雷达新体制。

毛主席教导我们：“**要自学，靠自己学**”、“**要把精力集中在培养分析问题和解决问题的能力上**”。为了便于自学，根据辩证唯物论的认识论的规律，在内容的安排上注意由浅入深、由特殊到一般，而力求理论和实践相结合。既加强基本原理的分析和物理概念的建立，又注意典型设备的举例以及工程中有用数据的介绍。但考虑到保密的要求，在涉及具体侦察、干扰机的地方，均以美帝苏修的侦察、干扰设备为例。本书在内容选取上做了适当的放宽，以适应不同教学班及深入自学的需要，这类内容均在目录中及有关章节的标题上加注“*”号，做为教学时选材的参考。

本书由林象平，韩培尧，冯献成三同志分别执笔编写。编写中得到教研室领导和同志们的指导和帮助，本书初稿经过两届工农兵学员班教学实践试用，在工农兵学员同志的支持和帮助下，发现和改正了许多不妥和错误之处。但由于我们马列和毛主席著作学习不够，政治思想和业务水平很低以及实践经验不足，书中的不妥和错误还会不少，我们诚恳地希望同志们提出批评和意见，以便修改。

在本书编写过程中，我们得到了九二四厂，一〇二四所，七二三所等兄弟单位的大力支持和帮助，书中第七章的初稿是由六机部一所郑恩博同志编写的，在此表示衷心的感谢。

编 者

上册目录

第一章 雷达侦察干扰概述	1
§ 1-1 电子对抗的意义及其在国防上的重要性	1
一、电子对抗, 电子战	1
二、雷达侦察干扰在国防上的重要性	2
§ 1-2 雷达概述	3
一、雷达探测目标的物理基础	3
二、雷达的基本组成及各部件的功用和特点	5
三、雷达的工作波段	7
四、雷达的分类	10
五、雷达的战术技术参数	11
§ 1-3 雷达侦察概述	12
一、雷达侦察的基本任务	12
二、雷达侦察机的组成及工作原理	14
三、雷达侦察的优点及局限性	16
四、雷达侦察机的分类	16
五、雷达侦察机的战术技术参数	17
§ 1-4 雷达干扰概述	18
一、雷达干扰的种类	18
二、消极干扰	19
三、积极干扰的分类和干扰的强度等级	23
四、雷达干扰机的基本工作原理及组成	26
五、雷达干扰机的战术技术参数	28
第二章 雷达测距	29
§ 2-1 脉冲法测距原理及 A 型显示器	29
§ 2-2 测距误差来源及提高精度办法	32
一、误差来源分析	32
二、提高精度的方法	33
§ 2-3 距离—数码变换器*	46
一、距离—数码变换器工作原理	46
二、误差来源及减小的方法	48
§ 2-4 距离分辨率及最小作用距离	52
§ 2-5 调频测距法	53
一、基本工作原理	53
二、测距误差与最小可测距离	55
三、调频法测量多个目标的距离	56

第三章 无线电定向 (测向)	59
§ 3-1 概述	59
§ 3-2 相位法定向	61
一、基本原理	61
二、测量精度与多值性问题	63
§ 3-3 振幅法定向 (测向)	64
一、最大信号法	64
二、最小信号法	66
三、等信号法	66
四、比较信号法	68
§ 3-4 雷达对目标方位及仰角 (高度) 的测定	69
一、全景雷达 (环视雷达)	69
二、利用扁平波束的测高雷达	71
三、全景雷达与测高雷达协同使用和交叉波束三座标雷达	72
四、V 型波束雷达	73
五、单波束三座标雷达	74
六、复波束三座标雷达*	76
§ 3-5 波束扫描与复 (多) 波束形成	77
一、机械扫描	77
二、电扫描	79
三、多波束 (复波束) 形成*	91
§ 3-6 P 型显示器与 B 型显示器	95
一、环视显示器 (P 型显示器)	95
二、B 型显示器 (距离方位显示器)*	101
§ 3-7 交叉定位 (测向定位)	105
§ 3-8 角度——数码变换器*	108
一、旋转变压器	108
二、光码盘法	108
第四章 雷达自动跟踪系统	110
§ 4-1 圆锥扫描雷达	110
一、基本工作原理	110
二、圆锥扫描跟踪雷达的组成	113
三、圆锥扫描雷达测量误差*	115
四、圆锥扫描雷达的优点及存在的问题	125
§ 4-2 单脉冲雷达	125
一、振幅和差单脉冲的基本工作原理	125
二、振幅和差单脉冲雷达的几个高频部件	128
三、振幅和差单脉冲雷达的讯道简化及假单脉冲	134
四、相位单脉冲雷达	136

§ 4-3 直线扫描自动测向	138
§ 4-4 雷达自动距离跟踪	140
一、基本工作原理	140
二、模拟式自动测距各部件的功用	140
三、自动距离跟踪系统的记忆, 搜索与截获	144
四、自动距离跟踪系统的精度与分辨率	146
五、数字式自动距离跟踪系统简介	146
第五章 雷达测速和动目标选择	148
§ 5-1 连续波多卜勒雷达工作原理	148
一、多卜勒效应	148
二、连续波多卜勒雷达的方框组成	150
三、多卜勒频率测量	151
四、多卜勒信号频谱·干扰及滤波	153
五、多卜勒频率跟踪(自动速度跟踪)	155
六、连续波多卜勒雷达测距	160
七、连续波多卜勒雷达的特点	161
§ 5-2 脉冲雷达提取多卜勒信息	161
一、脉冲相干雷达提取多卜勒信息	161
二、频闪效应与速度模糊	164
三、克服速度模糊与距离模糊的办法	166
四、低重复频率(正常重复频率)脉冲雷达测速	167
§ 5-3 动目标显示雷达(MTI)	168
一、固定目标的消除	168
二、盲速及盲相的克服	171
三、相干(参)振荡的获得	175
四、迟延线相消设备	177
五、门控式动目标显示*	179
六、数字动目标显示(D、M、T、I)*	180
七、动目标显示雷达的质量指标	182
§ 5-4 脉冲多卜勒雷达(PD雷达)*	183
一、空用脉冲多卜勒雷达回波信号频谱	183
二、组成方框图	185
三、搜索跟踪的转换	187
第六章 作用距离方程及空间能量计算	189
§ 6-1 自由空间雷达作用距离的基本方程式	189
§ 6-2 目标有效散射面积	191
一、关于目标有效散射面积的概念	191
二、简单目标的散射面积	192
三、群集目标的有效散射面积*	192

四、飞机舰艇的有效散射面积	197
五、面分布目标与体分布目标	197
§ 6-3 最小可测信号 (接收机门限功率)	201
一、最小可测信号的意义	201
二、噪声与信号迭加的统计特性	202
三、发现概率, 虚警概率与所需信噪比 (识别系数)	206
四、雷达脉冲积累	211
§ 6-4 传播过程中诸因素对作用距离的影响	214
一、地面 (或水面) 电波反射现象对雷达作用距离的影响	214
二、大气衰减对作用距离的影响	216
三、地球曲率对雷达作用距离的影响	217
§ 6-5 侦察作用距离	219
一、侦察方程	219
二、信号极化的影响	223
三、雷达天线旁瓣的利用	226
四、散射侦察的作用距离*	230
§ 6-6 干扰方程及有效干扰区	232
一、干扰方程 (反雷达方程)	232
二、有效干扰距离及有效干扰区	235
三、干扰扇面	237
四、干扰机掩护运动目标时的有效干扰区	240
五、干扰机掩护固定目标时的有效干扰区	242
六、干扰机的掩护角及干扰机的功率配合*	245
七、对利用通信原理工作的电子系统的干扰方程及有效干扰区*	247
第七章 对雷达方位和频率的侦察	251
§ 7-1 侦察设备的测向方法	251
一、侦察设备测向的基本要求	251
二、侦察测向方法分类	251
三、方位非搜索法	252
四、方位慢速可靠搜索	254
五、方位快速可靠搜索	257
六、方位概率搜索	259
§ 7-2 侦察设备测频方法	261
一、对测频设备的要求	261
二、测频方法的分类	261
三、频率非搜索法	261
四、频率搜索法	268
§ 7-3 方位、频率同时搜索	279

第一章 雷达侦察干扰概述

本章首先介绍电子对抗的意义和范畴以及雷达、侦察、干扰在国防上的重要性,然后分别介绍雷达、侦察和干扰设备的基本工作原理和组成以及他们的分类和特点。通过对本章内容的了解,可以使我们对雷达、侦察和干扰有一总的初步的概念,为学习后面各章打下基础。

伟大领袖毛主席教导我们:“**提高警惕,保卫祖国**”,“**备战、备荒、为人民**”,“**深挖洞,广积粮,不称霸**”。党的十大号召我们“**务必加强反侵略战争的准备,警惕帝国主义世界大战的爆发,别特警惕社会帝国主义的突然袭击,坚决、彻底、干净、全部地消灭一切敢于来犯之敌!**”

雷达侦察和干扰设备是对敌斗争的重要武器。特别是对于大量装备着各式雷达和电子设备的苏修、美帝的侵略,雷达侦察和干扰在保卫社会主义祖国,对付敌人的突然袭击方面更有着突出的作用。侦察干扰设备又是我军部队和革命群众在进行反侵略的人民战争中发现敌人、打击敌人的有利武器,使来犯之敌陷于灭顶之灾。

毛主席还教导我们:“**矛盾着的对立面又统一,又斗争,由此推动事物的运动和变化。**”雷达侦察和干扰是雷达的对立面,因此,侦察干扰技术的发展必将有利于我国雷达技术以及整个军事电子学的发展。

让我们牢记毛主席的教导,为了反对帝国主义的侵略,保卫祖国,支持世界被压迫人民和民族的革命斗争,努力学习,刻苦钻研,掌握雷达侦察干扰技术,为现代化国防建设事业做出自己应有的贡献。

§ 1-1 电子对抗的意义及其在国防上的重要性

一、电子对抗,电子战

电子对抗也被广泛地称为电子战,指的是敌我双方用专门的无线电电子设备进行的相互斗争。

电子对抗的作用是通过破坏敌人无线电电子设备的功能达到使敌人的情报指挥系统失灵和使敌人的杀伤武器(如火炮的瞄准、导弹的制导等)失效的目的。因此,电子对抗已经成为军事电子学领域中发展最快的重要技术部门之一。

电子对抗的范围很广,其中包括通信对抗、雷达对抗、导航对抗、制导对抗等无线电电子对抗,此外还包括声纳对抗、红外对抗、激光对抗等技术领域。

对抗一词指的是两个对立面的相互斗争。因此,电子对抗就应包括两个相互斗争着的方面,即一方利用各种手段以破坏和减弱敌方无线电设备的威力和效能,另一方则采取对抗措施来消除其有害影响。以雷达的电子对抗来说,就包括对雷达的侦察、干扰和雷达的反侦察、反干扰两个相互斗争着的方面。但习惯上,常把前者叫做雷达对抗,而把后者直接称为雷达反干扰。

在国外资料中则通常把电子战(EW)分为电子对抗(ECM)和电子反对抗(ECCM)

两个方面。电子对抗又包括用来发现、鉴别和警报敌人威胁的各种侦察系统，称为消极电子对抗（Passive ECM）系统，及对敌电子设备进行干扰的系统，称为积极电子对抗（Active ECM）系统。而电子反对抗就指的是雷达的反侦察、反干扰措施。

二、雷达侦察干扰在国防上的重要性

即雷达侦察干扰的重要性的和雷达的重要性是密切相关而不可分的。

雷达是现代战争中一种性能优良的重要的军事装备。它能不受天候限制、不分昼夜、快速准确地、在很远的距离上发现目标和测定其位置，因而被称为国防上的“千里眼”，同时，它又是杀伤武器系统的一个组成部分，成为炮火瞄准、导弹制导、轰炸瞄准等武器系统的“神经中枢”。

雷达的大量使用，使得雷达侦察和干扰有着发挥作用的广阔的天地。雷达必须发射强功率信号和接收极微弱的信号，又为侦察和干扰提供了有利的条件和可能。因此，在战争中，只要发现了敌人的雷达及其动态都是极其重要的军事情报和有价值的技术情报，而干扰和压制了敌人雷达就会使敌人作战能力受到很大的损失。

侦察和干扰的重要性还可以用一些具体材料来充分地说明：在第二次世界大战末期，几乎所有的重要战役中，都大量使用了雷达侦察和干扰。据统计，由于英美对德国雷达施放了各种干扰使得击落一架飞机所需的炮弹由 800 发增加到 3000 发，因而使轰炸机的损失减少了一半。在英美对德国进行的诺曼弟半岛登陆战役中，由于采用了全面的电子对抗措施，使得参加战役的 2127 艘舰艇只损失了 6 艘。近年来，在苏美两霸进行扩张的紧张斗争中，它们都非常重视电子对抗斗争。例如，由于美帝综合应用了各种电子对抗措施，使得苏修“萨姆-1”地空导弹的命中率降低到只有 20%。而苏修雷达系统采用多频段工作、多重配置等电子对抗措施之后，又导致大量具有一定电子战能力的美帝飞机被击落。来自国外期刊的这些材料虽然只能作为参考，但也足以说明电子侦察和干扰的重要性。

雷达侦察干扰在我国战备和国防现代化建设中可以发挥重要的作用：

1. 防止帝国主义，特别是社会帝国主义对我国的侵略和突然袭击。

雷达侦察在防止敌人突然袭击方面，有着优异的性能，雷达侦察站可以和雷达站互相配合共同组成严密的雷达网。雷达侦察比雷达发现敌目标远、发现的早而且自己是隐蔽的。实战表明，简单的侦察站通常也比雷达早发现敌情，早报几分钟、甚至早报几十分钟。侦察可以根据雷达信号准确地判明目标雷达的型号、飞机类型和架数，更是雷达所不具备的能力。

2. 在人民战争中，是发现敌人、消灭敌人、全歼入侵之敌的有力武器。

毛主席教导我们：“战争的目的不是别的，就是‘保存自己，消灭敌人’。”雷达侦察和红外侦察可使我军隐蔽地发现敌人，包围敌人，接近敌人，充分发挥我军夜战近战的威力。同时，在人民战争条件下，就是轻便的、简单的雷达干扰机也可以发挥很大的作用，产生很大的干扰效果。

3. 促进我国军事电子技术的发展

“一切事物中包含的矛盾方面的相互依赖和相互斗争，决定一切事物的生命，推动一切事物的发展”。雷达侦察干扰和雷达的发展是相互促进的。可以说，如果没有自己的电子对抗技术的发展，雷达技术和其抗干扰性能也不可能得到迅速的提高。

此外，雷达侦察可用来检查我雷达布署是否合理，雷达网是否严密可靠。雷达干扰则是

我雷达站干扰训练, 提高雷达抗干扰能力所必不可少的装备。

§ 1-2 雷达概述

雷达是英文 Radar[“Radio Detection and Ranging” 的缩写]的音译, 原意为“无线电探测和测距”, 亦即用无线电的方法发现并测定目标的空间位置, 因此雷达也称为“无线电定位”。

雷达是利用目标对电磁波的二次发射现象来发现目标和测定目标位置的。因此, 飞机、导弹、人造卫星、各种舰船、车辆、兵器、炮弹、工厂、桥梁、居民点、山川、云雨等等, 都可以成为雷达探测的目标, 使雷达具有极其广泛的用途。

雷达在军事上做为敌袭兵器预警和我兵器指挥控制的装备, 起着十分重要的作用。在国民经济及科学研究中, 雷达亦占有相当重要的地位, 如在导航、气象、天文、空间技术、大地测量以及探矿等许多部门中, 日益获得广泛的应用。

雷达所以受到重视, 是由于它的优越的性能。如有较大的作用距离, 几乎在任何气象条件下以及不分昼夜和地域均可工作。它测定目标有较高的准确度, 能自动搜索和跟踪目标, 通过一定的附属设备还可以识别敌我, 显示目标的批次和航迹等。

一、雷达探测目标的物理基础

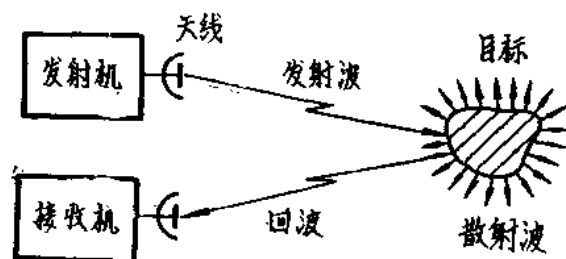


图 1-1 雷达发现目标的原理

雷达发现目标是基于, 在雷达发射的高频无线电波的照射下, 目标产生的二次发射现象(散射)所产生的回波来发现目标的, 其原理如图 1-1 所示。或者简单地说, 雷达是根据接收到目标的回波来发现目标的

发现目标是进一步测定目标坐标的基础。由于回波是很微弱的, 并且存在着雷达本身的及外界进入雷达的干扰, 因此发现目标始终是现代雷达重要而艰难的任务。

雷达对目标位置的测定。目标的空间位置, 可以用多种坐标来表示。对于雷达, 最为简便的是采用极坐标, 如图 1-2 所示。以雷达所在地为坐标原点 O , 则目标 A 的空间位置可表示为的斜距 R 方位角 α 和仰角 β 三个量, 或表示为方位角 α 、水平距离 D 和高度 H 三个量。显然, 目标的高度 H 及水平距离 D 和斜距 R 及仰角 β 间的关系为:

$$\begin{aligned} H &= R \sin \beta \\ D &= R \cos \beta \end{aligned} \quad (1-1)$$

所以测定目标位置，实质上就是测距和测角坐标问题，即测定目标的斜距和两个角度（ α 和 B ）这样三个坐标数据的问题。

雷达测距是基于无线电波在空间以等速直线传播这一物理现象，测出雷达从发射电波到

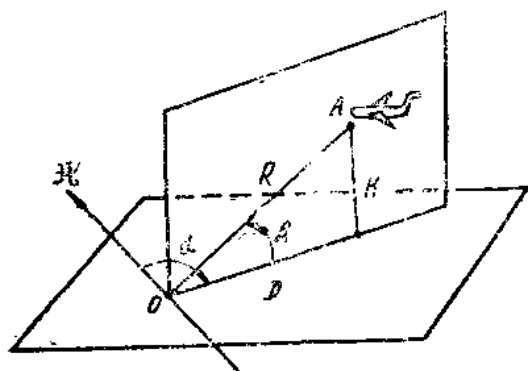


图 1-2 目标位置的极坐标表示

收到目标回波所需的时间间隔，便可确定目标到雷达的距离。所以，雷达测距问题，实质上是测量时间问题。

设电波往返于雷达与目标之间，走过二倍斜距 R 的时间为 t ，即可根据公式

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

算出目标斜距 R 来。式中 C 为电波在空间的传播速度即光速， $C = 3 \times 10^8$ 米/秒。

由于光速很快，因而 t 值一般均很小，单位以微秒计。将上式以常用单位表示之，即 R 以米计，时间以微秒计，则有：

$$R(M) = 150t(\mu s) \quad (1-3)$$

如果目标距离雷达 150 公里，由上式可知，电波往返的时间 t 仅有 1000 微秒。可以看出，雷达测距过程是极为短暂的。

另外，测距准确度取决于测量时间的准确度。1 微秒的测时误差就相当于 150 米的距离误差。如果要求测距准确度为 ± 15 米，炮火瞄准雷达就是这样要求的，则由上式可知，测时准确度应为 $\Delta t = 0.1$ 微秒。

显然这样快和这样准的测量时间，如果用普通钟表是不可能的。雷达采用的计时装置是用电子射线管（示波管）显示及用高速计数装置和数字显示技术。

雷达对目标角坐标的测量（测向），是基于电波的直线传播，通过天线的方向性发射和接收来实现的。在雷达发现目标时，只要测出回波的方向，则这个方向就是目标所在的方向。

为了测向，雷达通常采用方向性天线将发射功率集中成很窄的波束。只有波束照射到目标时，雷达才能收到回波。只有波束最大值对准目标，回波才最强。于是回波最强时天线的指向也就是目标的方向，如图 1-3 所示。

所以，雷达测量目标角坐标问题，实质上是测量回波方向问题。

雷达还广泛地用来测量目标的运动速度。当目标与雷达之间有相对运动时，所收到的回波频率将不同于发射时的频率。这个频率差称为多卜勒频移，以 f_d 表之，其表示式为：

$$f_d = 2f_0 \frac{V_r}{C} \quad (1-4)$$

其中 f_0 为发射波的频率， C 为光速， V_r 为目标对雷达的径向速度。因而，测得 f_d 的大小，就可以确定目标对雷达的相对运动速度的大小和方向，从而实施对目标未来坐标的预测，提高跟踪精度。此外，利用多卜勒频移信息还可以实现对运动目标的显示。

二、雷达的基本组成及各部件的功用和特点

雷达为了实现对目标的探测任务，有许多可兹利用的体制。现仅以最简单、最普通的脉冲雷达为例，说明雷达的基本工作原理，基本组成部分，以及各部件的功用和特点。

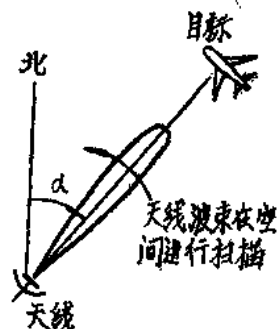
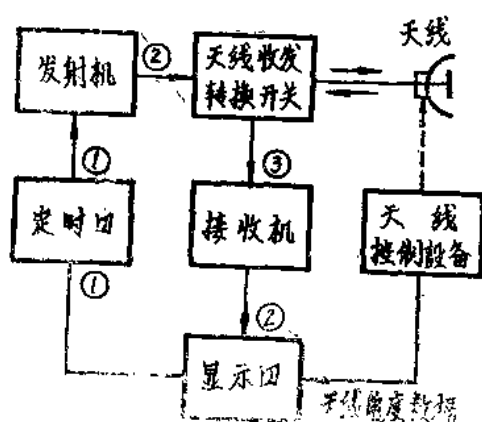
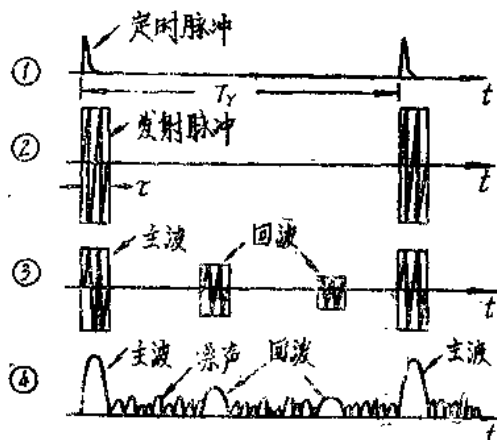


图 1-3 雷达对目标的测向

图 1-4 画出了脉冲雷达的简单方框图和主要波形图。其工作过程是：发射机在定时器的触发下，周期性地产生短促高频强力脉冲，通过天线形成很窄的无线电波束向空间辐射，天线由天线控制设备所操纵，使波束在空中进行扫描以探测目标，当天线波束照射到目标时，



(a) 方框图



(b) 波形图

图 1-4 脉冲雷达方框图及主要波形图

回波又被天线所接收，经过天线收发转换开关送到接收机，接收机将收到的信号（包括由天线收发转换开关漏过来的探测脉冲而形成的主波和目标回波）进行放大、变频、检波后，以视频脉冲加至显示器，完成对目标的观测。

为了准确地测量时间，需使发射机发射时间和显示器的计时起点严格同步，这由定时器同时向二者发出一个时间基准信号即定时脉冲来完成。定时器实际上是一个触发脉冲产生器。在雷达机中，定时器可以是一个独立部件，也可以和发射机的调制器或和显示器在一起，但它使整个雷达各部分在时间上协调一致、同步工作的作用，是任何一部雷达所不可缺少的。

发射机的作用是产生强功率的高频脉冲。发射机通常包括高频振荡器和脉冲调制器两个

部分。发射功率越大，雷达的作用距离越远。早期的雷达的发射脉冲功率为几十至几百千瓦，现代雷达已达几兆瓦。除米波波段的雷达发射管仍用超高频三、四极管外，现在大多数分米波、厘米波波段的雷达都是用磁控管。磁控管的优点是在同等功率情况下，它的体积重量比其它管子小。新型雷达已在采用速调管、反波管、泊管等新型微波功率管作为功率源，它们除了功率大，效率高以外，大多还具有调谐快和调谐范围宽等特点。

调制器在定时器的触发下，产生一高压脉冲加到磁控管上。这一高压脉冲也就是磁控管的电源，磁控管在此高压脉冲作用下，产生高频振荡经天线发射出去。因此，雷达发射脉冲的波形和脉冲宽度主要由调制器确定的。脉冲宽度越窄，测距准确度高，距离分辨率也高，也有利于提高发射机效率。一般来说，分米波雷达为几个微秒，厘米波雷达1~2微秒以至小于一微秒（例如0.5微秒），毫米波雷达的脉冲宽度更小。

雷达天线是方向性很强的天线，它把发射功率集中成极窄的波束以探测目标。波束越窄，发射功率越集中，作用距离越远，同时波束越窄，测向准确度高，方向分辨率也越强。雷达天线的波束宽度，米波雷达约为几度至十几度，厘米波雷达为几度以至1~2度。

天线控制设备控制和驱动天线进行空间扫描，同时把天线所指的方向数据送至显示器，因而在显示器上能随时读出天线的方向数据。一旦显示器上出现目标信号，即可读出目标的方向。天线控制设备是一个精密的自动控制系统，一般是机电传动的，新式雷达多采用液压传动，甚至数字化传动系统。天线控制系统的性能直接影响雷达的测向精度和方向跟踪的误差。

由于雷达的收发共处一地，且发射脉冲时间十分短促，而接收回波是在发射间隙内进行的，为了简化雷达的结构，希望收发共用一个天线，这就需要有一个天线收发转换开关。其作用是，当发射时，仅使发射机与天线接通，而将接收机的通路断开，以防止发射的强大功率将接收机烧毁；而在发射脉冲过后，即接收信号时，又仅使天线与接收机相通，断开去发射机的通路，使回波信号只能进入接收机，不致把原已极微弱的回波信号受发射支路的吸收而减弱。天线收发转换开关是用微波传输线段和放电管构成的，或用微波环行器来实现。天线收发转换开关尽管十分灵敏，但总有极微小的一部分发射脉冲功率漏入接收机，它比回波信号仍强的多，在显示器的时基线起始点上形成主波信号。

雷达接收机把天线所接收的微弱的高频目标回波信号放大检波后送到显示器。雷达接收机通常是超外差式的，包括高频放大、混频、中频放大、检波、视频放大等电路。早期的雷达，除了米波雷达用三极管五极管作高频放大器外，厘米波段的雷达由于当时没有合适的高频放大器件，所以接收信号直接加到混频器。现代雷达则多采用低噪声的行波管放大器以及参量放大器作为高频放大器，使雷达接收机的灵敏度大大地提高。雷达接收机的灵敏度一般是 $10^{-12} \sim 10^{-14}$ 瓦。

显示器是雷达发现目标和测定目标坐标的设备。最常见的显示器型式是距离显示器（也称为A式显示器）和平面位置显示器（也称为环视显示器或P式显示器）。

距离显示器荧光屏的图象如图1-5所示。由于发射机和显示器同时受到定时器触发脉冲的触发，所以发射脉冲位于显示器时基扫描线的起点，扫描线是电子束在和时间成正比变化的锯齿波电压作用下在荧光屏上由左向右等速移动而形成的，这样，目标回波就出现在时基线上与目标距离相应的位置上。为了测距准确方便，往往在时基线上直接标以距离刻度（机械刻度和电的刻度）。扫描线的长度代表雷达作用距离的范围。从图中还可以看出，除了主

波和目标回波外，还存在着近处地物（山、高大建筑物等）回波和充满扫描线的杂乱无章随机起伏的噪声波形。这些都是对观测目标不利的干扰信号。雷达操纵员就是在这些干扰的背景中发现目标回波和读出目标距离的，并根据回波的大小、跳动的特点来判断目标的性质。

距离显示器常用短余辉的静电偏转示波管，它能快速的显示目标波形的变化和准确测定目标的距离，所以是雷达最普遍的一种显示器。但它的缺点是只当天线对向目标时才能看到目标回波，这不利于连续掌握目标。因此，便需要一种能够全面掌握空情的显示器，这就是下面要介绍的平面位置显示器。

平面位置显示器的荧光屏上的信号图象如图 1-6 所示。扫描线是自荧光屏的圆心沿半径方向向外扫描，所以圆心就是雷达所在的位置（为了不使圆心太亮和荧光屏物质被电子束烧坏，主波都是被匿影掉了）。同时，扫描线还通过机械的或电的办法跟随着天线作同步地旋转，这样当天线在空间扫描一周，荧光屏上的扫描线也旋转一周，把四面八方的目标回波显示在它们相应的方向上。目标是辉亮的光点或短的圆弧。光点至圆心的距离为目标的目标距离，光点中心的方向为目标的目标方位。这种显示器能够读出目标的距离和方位两个数据，但不能读出目标的高度。所以称为平面位置显示器（PPI）或简称为P式显示器。

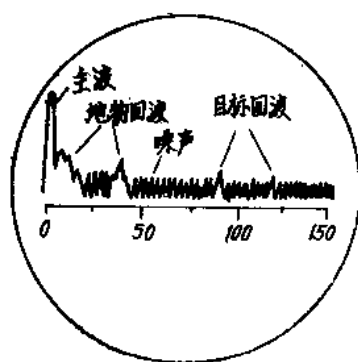


图 1-5 距离显示器荧光屏

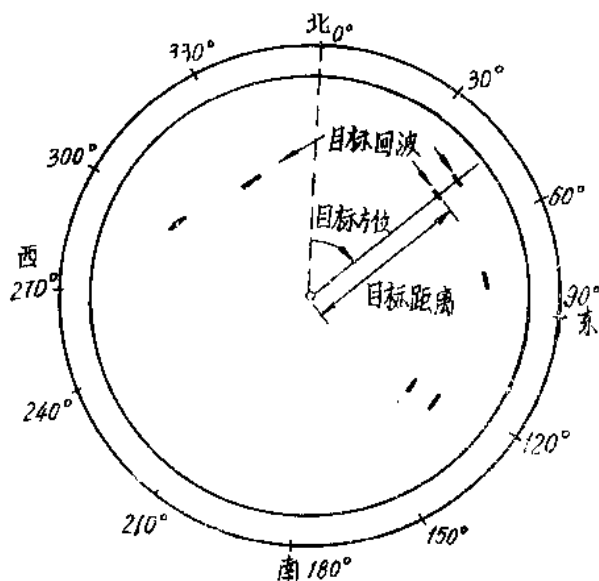


图 1-6 平面位置显示器荧光屏

P 式显示器都采用长余辉的磁偏转示波管。因为雷达天线的转速通常是每分钟几转到几十转，旋转一周的时间便为十几秒至几十秒。为了连续地掌握空情和观测目标的方便，采用长余辉的示波管可以使得天线第二次照射到目标时，第一次照射时显示的目标亮点还不致消逝。P 式显示器由于是亮度显示，所以不如A 式显示器测距准，也不能根据目标波形的变化获取更多的目标信息。

三、雷达的工作波段

雷达通常工作于超短波及微波波段，它在整个无线电频谱中的位置见图 1-7 所示，即工作波长约从10米的米波波段至波长小于1厘米的毫米波波段，相应的频率约为30兆赫(MC)

至 100 千兆赫 (GC)。在频段上跨甚高频、特高频、超高频和极高频四个频段。

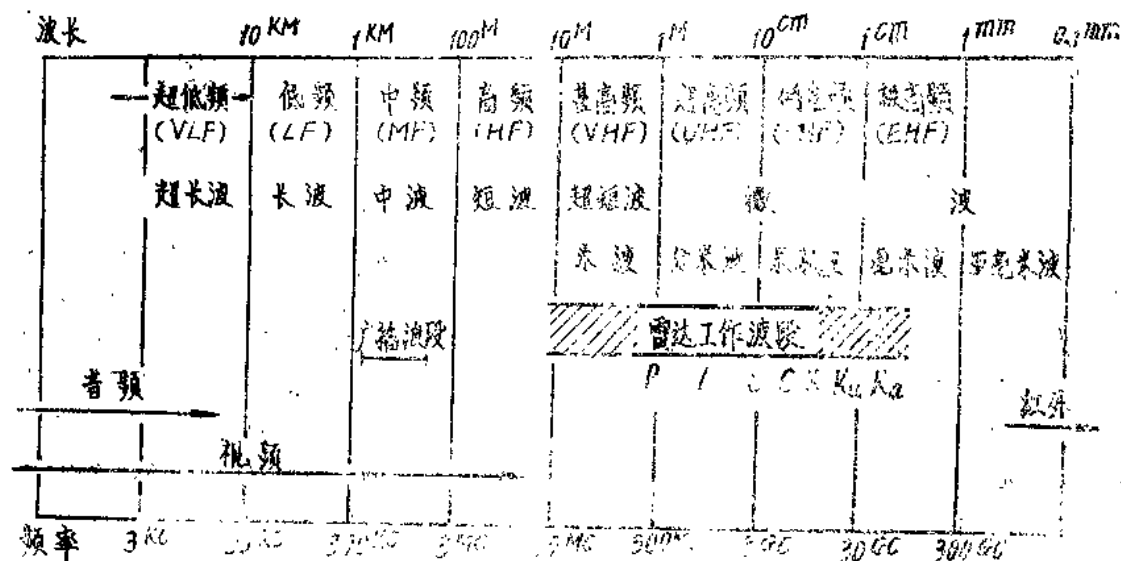


图 1-7 雷达工作波段与无线电频谱

频率和波长的关系为 $f\lambda = C = 300 \times 10^6$ 米/秒。

雷达为什么必须工作在超短波和微波波段，而波长不能过长？这是由于雷达所依靠的物理基础决定的。

1. 由超高频技术可知，只有当目标的几何尺寸大于电波的波长时，才能产生较强的二次发射现象。例如，对于飞机这样大的目标，波长小于 10 米才能产生强的回波，但对于炮弹这样小的目标，这样的波长就不能产生足够强的回波，必须用波长短于 10 厘米，以至于 3 厘米，1 厘米或毫米波段。

2. 只有使用较短的波长，天线才有较高的辐射效率，才可以用较小的尺寸获得较强的方向性，从而得到较高的测角精度及角分辨率。天线的方向性强，波束宽度窄了，可以把雷达发射功率集中成狭窄的射束，等于提高了雷达的有效发射功率，从而可以增大雷达的探测距离。例如，要得到 3 度的波束宽度，对于 3 厘米波段，用直径约为 70 厘米的抛物面天线即可实现，要是工作在 3 米的波长，天线直径就要有 70 米那样大。

3. 在超短波及微波波段，电波才不致被电离层反射而直线传播。我们知道，电离层对小于 20 兆赫的短波能产生强烈的反射，而对于 30 兆赫以上的电波则反射甚微。因此，雷达应工作在超短波及微波波段，才能实现对目标的直接探测，才能避免从电离层反射回来的假信号造成的混乱。

雷达的发展过程，实际上也是由波长较长的米波、分米波发展到厘米波、毫米波波段，是不是雷达的工作波段越来越短呢？“世界上的事情是复杂的，是由各方面的因素决定的。看问题要从各方面去看，不能只从单方面看。”对雷达的工作波段的选择，也是这样。一般地说，雷达发射功率管可能得到的功率容量随波长减短而减小，接收机的灵敏度因波长减短而降低，大气、云雨对电波的衰减因波长减短而增大。而天线增益则因波长缩短（在同样的天线孔而尺寸下）而增大，波束宽度会变窄，雷达发射信号的频谱可随波长缩短而便于加

宽。由此可见，雷达的工作波段对雷达的性能有严重的影响。从雷达的最大作用距离、准确度和分辨率、体积和重量三个重要的战术性能来看，如要增大作用距离，雷达工作波长不宜过短，如要提高测量精度和分辨能力和减小雷达体积重量，则工作波长不宜过长。所以远程搜索雷达常用米波、分米波及厘米波的低频端（10厘米），而精密跟踪雷达通常选用十厘米、五厘米、三厘米以及一厘米波段。至于要求高鉴别率、高精度的小巧雷达（如飞机盲目着陆雷达、坦克和兵器搜索雷达及迫击炮弹跟踪雷达等）则已采用毫米波段。

由于电子对抗的广泛使用，使得雷达向着多种波段工作的方向发展，已经开辟的工作波段仍继续使用，并积极进行新波段的开辟工作，向着更高和更低的波段和未曾使用过的波段发展。新的电真空器件和微波技术的发展，不仅使得单个雷达的占有波段增宽了，而且由于雷达系列化，使得雷达波段有着连绵不断的发展趋向。

了解雷达波段的分布和发展情况，对侦察和干扰来说是十分重要的，因为只有在波段上相同，在频率上对准，才可能实现对雷达的侦察和干扰。此外，既然是同波段，雷达侦察干扰与雷达在技术实现上，就有许多共同之处。

雷达波段的划分及表示方法有很多种，常见的几种如图 1-8 所示。

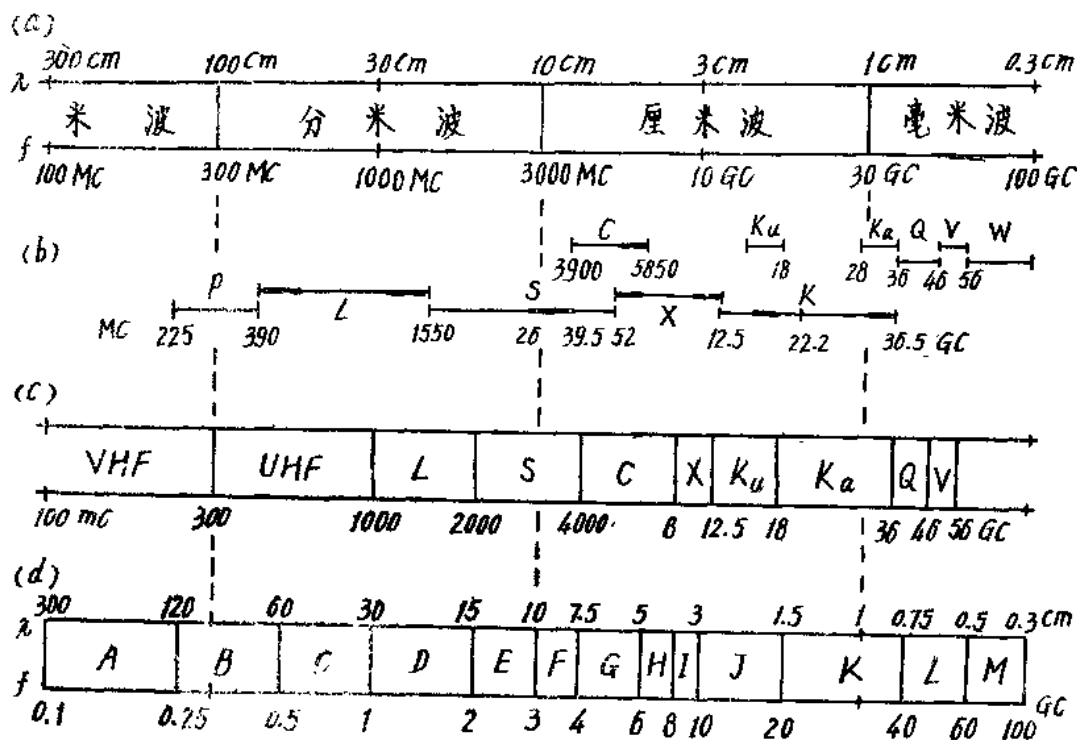


图 1-8 雷达常用波段的划分

我国广为采用的是以波长来划分波段，将雷达波段分为米波、分米波、厘米波等，如图中之 (a)。这样划分比较直观简洁。为了进一步说明雷达的技术特点，则直接以具体的波长来表明雷达的波段，如10厘米、3厘米、8毫米等等。

图中之 (b) 是在资料中常常见到以英文大写字母表示的雷达波段。这是二次世界大战期间英美为了保密，对军用雷达波段的一种表示方法，沿用至今。最初是P、L、S、X、K几个

波段，后来由于新的微波器件的出现，形成了如图中粗线部所示的使用最多的一些波段范围，因而才划出了C波段、 K_u 和 K_a 波段，并增加了Q、V、W等波段，而P波段已较少见用了。这种波段划分虽然比较粗糙，但能反映微波技术特点，因而在国外得到广泛的采用。应当指出，各个波段的具体频率范围，英美间也不尽相同，就是在美国也曾几度调整，而且不同技术部门和系统也有区别。图中所示的频率范围是比较常用的数据。

图中之(d)是七十年代以来，美国军用雷达波段优先采用的方案，将雷达波段从低到高按A、B、C、D、……的字母顺序排列，各个波段的范围也作了较合理的调整。图中之(c)是在这个基础上重新把旧的军用雷达波段作了调整并和无线电波段统一起来，而原来常用的波段的主要部分得以保留下来。即L波段代表以22厘米为中心的20~25厘米段，S波段代表10厘米，C波段代表5厘米，X波段代表3厘米， K_u 波段代表2.2厘米， K_a 波段代表8毫米等等。

四、雷达的分类

把雷达分类的目的是为了说明雷达的特征。现在普遍采用的比较合理的分类方法是按下列几个特征来分类：

- (1) 按雷达装置环境和使用条件；
- (2) 按雷达的波段；
- (3) 雷达的功能与用途；
- (4) 雷达的工作方式和信号特征；

根据这四个特征，可以对雷达作一般的定性描述。例如，某一雷达(1)地面的；(2)L波段；(3)搜索预警；(4)脉冲动目标显示雷达。

雷达按其装置环境和使用条件分类有：空用，地面，舰用等。按机动性可分为固定的，车载的，机(弹)载的，便携式等。

雷达的装置环境和使用条件对于雷达的实际设计有特殊重要意义。例如空用雷达，对体积、重量有严格要求，对温度、湿度、冲击、震动等方面有苛刻的指标。为此，不论在结构上，还是线路的元件器件上，都应进行严格的检验。

按信号形式可分为：脉冲雷达与连续波雷达。脉冲雷达又可分为一般的周期性窄脉冲雷达和脉冲压缩雷达。连续波雷达又包括相位雷达，调频雷达以及连续波多卜勒雷达等。

按工作方式分为搜索雷达，跟踪雷达以及边搜索边跟踪雷达。

按照用途来分，军用雷达有下列几种主要类型：

1. 远程警戒雷达。这种雷达的首要任务是在尽可能远的距离上发现目标和确定目标的性质。它总是尽可能的增大作用距离，例如对飞机目标在四五百公里以上，对洲际导弹要求达数千公里，而对于测定目标的准确度和分辨率则是次要的要求，并且通常也不要求测定目标高度。

2. 引导指挥雷达。用于歼击机的引导和指挥作战。这种雷达应能确定敌我飞机的准确坐标，指挥员根据雷达所得数据，用无线电指挥我机进入有利的攻击位置。这种雷达的作用距离，比起前者可以较小，但其测定坐标的精度和分辨率都必须较高，特别是要有较准确的高度数据。

3. 炮瞄雷达。用于控制火炮准确的跟踪目标和进行射击，也称为火控雷达。它应能连