

第 1 章 导 论

雷达(Radar)是“Radio Detection and Ranging”缩写的音译,其基本功能是利用目标对电磁波的散射而发现目标,并测定目标的空间位置。近年来,由于雷达采用了一些新理论、新技术(尤其数字化技术和高速软件编程技术)和新器件,雷达技术进入了一个新的发展阶段。特别是电子计算机的应用,以及各类新型光电集成元器件的出现,给现代雷达带来了根本性的变革。雷达的功能已超出了“无线电检测和测距”的含义,它还可以提取有关目标的更多信息,诸如测定目标的属性、目标的识别等。

雷达是集中了现代电子科学技术各种成就的高科技系统。众所周知,雷达已成功地应用于地面(含车载)、舰载、机载方面,这些雷达已经在执行着各种军事和民用任务。近年来,雷达应用已经向外层空间发展,出现了空间基(卫星载、航天飞机载、宇宙飞船载)雷达。同时雷达也向空间相反方向发展,出现了各种探地雷达,它已经或将要应用于探雷、资源勘探、地下构造“窥探”、地面危险物品侦察等方面。另外,民用各部门诸如气象、天文、遥感测绘、船只导航、直升机和汽车防撞、交通管制等领域中,雷达的应用越来越广泛,而且在数量上民用将远大于军用。总之,雷达应用的完整目录将需要列许多页,而且每年都增加新的条目。不过,应用的主要领域依然如表 1.1 所示。

表 1.1 雷达应用^[3]

空中监视	远程预警(包括机载预警)、地面控制的拦截、武器系统目标截获、测高和三坐标雷达、机场和空中航线监视
空间和导弹监视	弹道导弹告警、导弹截获、卫星监视
表面搜索和战场监视	海面搜索和导航、港口和航道控制、地面测绘、入侵检测、迫击炮和火炮定位、机场飞机跑道控制
跟踪和制导	高射炮火控、机载或舰载火控、导弹制导、靶场测量、卫星测量、精密进场和着陆
气象雷达	降雨和风的观察和预测、气象回避(对飞机)、晴空湍流探测、云能见度指示器
天文和大地测量	行星观测、地球勘测、电离层探测

本章主要介绍雷达的性能参数和技术参数,雷达的对抗和雷达的未来发展。本书的其余各章是在《雷达原理(第 4 版)》的基础上,首先在导论中对雷达的性能和发展作了概述,然后从第 2 章起介绍各种雷达系统的组成、工作原理和应用。本书将分别介绍诸如连续波雷达、单脉冲雷达、脉冲多普勒雷达、脉冲压缩雷达、边扫描边跟踪雷达等熟知的雷达,还介绍目前大家关注的相控阵雷达、数字阵列雷达、合成孔径雷达。由于后 3 种雷达技术上紧密联系,因此这几种雷达在所介绍的相关内容上分别轻重不同地分配在不同章节之中。最后,本书还简要介绍双基雷达、超视距雷达、超宽带雷达和毫米波雷达,它们也是今后发展的潜在雷达。

1.1 现代雷达发展史上的一些重大事件^{[1]、[3]、[5]、[11]}

在第二次世界大战全面开战前夕,诞生了电子新系统——雷达。时至今日,在这风风雨雨的近 80 年中,雷达经历了许多重大的事件,现作简要回顾。

1864 年,英国人麦克斯韦(James C. Maxwell)建立了无线电(电磁)波理论的基本公式。
1886—1888 年,德国人海因里奇·赫兹(Heinrich Hertz)验证了麦克斯韦的电波理论,获知

它具有与光波相同的电波传播特性。

1897 年,俄国人亚历山大·波波夫验证了利用无线电波可探测物体。

1903—1904 年,德国人克里斯琴·赫尔斯迈耶(Christian Hulsmeyer)研制出原始的船用防撞雷达并获得专利权。

1922 年,英国人 M. G. 马可尼(M. G. Marconi)在接受无线电工程师学会(IRE)荣誉奖章的讲话中,提出了一种船用防撞测角雷达的建议。

1925 年,美国人 G. 布赖特(G. Breit)和 M. 图夫(M. Tuve),通过阴极射线管观测到来自电离层的第一个短脉冲回波。

1934 年,海军研究实验室(Naval Research Lab.)的 R. M. 佩奇(R. M. Page)拍摄了第一张来自飞机的短脉冲回波照片。

1935 年,由英国人和德国人第一次验证了对飞机目标的短脉冲测距。

1937 年,由英国人罗伯特·沃森·瓦特(Robert Watson-Watt)设计的第一部可使用的雷达“Chain Home”在英国建成。

1938 年,美国陆军通信兵的 SCR—268 成为首次实用的防空火控雷达,后来生产了 3100 部。该雷达探测距离大于 100 海里,工作频率为 200MHz。

1939 年,研制成第一部实用舰载雷达——XAF,安装在美国海军纽约号(New York)战舰上,对飞机的探测距离为 85 海里。

1941 年 12 月,那时已生产了 100 部 SCR—270/271 陆军通信兵预警雷达。其中一部雷达架设在檀香山,它探测到了日本飞机对珍珠港的入侵。但是,将该反射回波信号误认为是友军飞机,铸成了大悲剧。

1943 年,同盟国用装备雷达的舰船来探测德国潜艇的通风管,导致德国海军蒙受重大损失。

20 世纪 30 年代,除英国、美国外,法国、苏联、德国和日本同时致力于雷达的研制。第二次世界大战期间,在英国的帮助下,美国在雷达方面的研制大大地超过了德国和日本,并在保证同盟国的胜利方面发挥了重要作用。在第二次世界大战末期,由于微波磁控管的研制成功和微波技术在雷达中的应用,使雷达技术得到了飞速的发展。与此同时,由于第二次世界大战中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 20 世纪 50 年代末以来,由于航天技术的飞速发展,飞机、导弹、人造卫星及宇宙飞船等均采用雷达作为探测和控制手段,因此各种类型飞行器载雷达得到飞速发展。尤其从 20 世纪末期以来,有源相控阵雷达在第四代和第五代战斗机中的应用,美国在 F—22 战斗机和 F—35 联合战斗机中配备以 AN/APG—77、AN/APG—79 和 AN/APG—81 为代表的有源相控阵雷达,标志着机载有源相控阵雷达性能已突破,并已可实战应用。另外,在 20 世纪 60 年代中期,由于反洲际弹道导弹系统提出了高精度、远距离、高分辨力和多目标测量的要求,使雷达技术进入蓬勃发展的时期。特别是 20 世纪 80 年代以后,由于弹道导弹具有突防能力、破坏力大,并能携带子母弹头、核弹头等优越性,而成为现代战争中最具有威胁性的攻击性武器之一。为了对付这一威胁,美国等均加强了对弹道导弹防御系统的研究和部署。

弹道导弹防御系统可分为战区导弹防御(TMD)系统和国家导弹防御(NMD)系统。这类系统是一种将各种反导武器综合在一起的“多层”防御体系。它以陆地、海面 and 空中为基点,全方位地实施拦截任务,在来袭导弹初始段、飞行段或再入段中将入侵导弹等武器予以摧毁。

战略弹道导弹防御系统中,一般由光、电、红外探测分系统,信息传输分系统和指挥控制中心等部分组成。其中,导弹预警中心主要由陆基相控阵雷达网、超视距雷达网、红外预警卫星网和

天基预警雷达网组成四合一的探测系统。这种四合一的战略导弹探测系统,除了能可靠地探测敌方从任意地点发射的战略和战术导弹,提供比较充裕的预警时间及敌方的战略、战术导弹攻防态势信息外,还能提供空间卫星和载人航天器的信息。

表 1.2 列出了不同阶段用于探测弹道导弹等突防兵器常用的雷达及其功能。TMD 和 NMD 系统对雷达的性能和功能提出了很高要求,促使雷达技术的发展迈入更高的发展阶段。

表 1.2 用于探测弹道导弹等突防兵器的常用雷达及其功能

突 防 阶 段	类 型	功 能
初始段 (助推段)	星载雷达	探测
	星载红外遥感	探测导弹发射
	预警机预警雷达	目标探测
	地面远程雷达	目标探测
中段	预警机预警雷达	目标探测
	地面远程雷达	目标探测
再入段	目标(指示)跟踪雷达	引导
	拦截导弹的制导雷达	照射跟踪
	导弹末制导	寻的跟踪

1.2 雷达技术发展现状^{[1]、[5]、[11]、[9]}

强大的军事能力大多源自其接入电磁频谱的能力。获取电磁频谱(EMS)是现代军事行动的先决条件。显然,电磁频谱不应再被视为使能因素,而是一个重要的作战域,与陆、海、空、天域行动等同。因此,电磁频谱已经成为 21 世纪至关重要的作战域。

陆、海、空、天和赛博行动日益依赖对电磁频谱的获取。所有联合功能——机动、火力、指挥控制、情报、防护以及供给均依靠应用频谱的能力。

由于严酷的环境、难对付的目标、稀缺的电磁频谱等诸多挑战,对雷达在多功能和多模式方面的性能需求也相应提高。这就呼唤创新性方法的出现,以更好地利用雷达提供的固有信息。

雷达技术发展现状可概括为以下几个方面。

① 军用雷达面临电子战中反雷达技术的威胁,特别是有源干扰和反辐射导弹的威胁。现在发展了多种抗有源干扰与抗反辐射导弹的技术,包括自适应天线方向图置零技术、自适应宽带跳频技术、多波段公用天线技术、诱饵技术、低截获概率技术等。

② 隐身飞机的出现,使微波波段目标飞机的雷达横截面积 σ 减少得很显著(10^{-2}m^2 量级),则要求雷达的灵敏度相应提高同样量级。目前反隐身雷达已采用低频段(米波、短波等)雷达技术、双(多)基地雷达技术、无源定位技术等。

③ 巡航导弹与低空飞机飞行高度低至 10m 以下,目标横截面积小到 $0.1\sim0.01\text{m}^2$ 。因此,对付低空入侵是雷达技术发展的又一挑战。采用升空平台技术、宽带雷达技术、脉冲多普勒雷达技术及毫米波雷达技术能有效对付低空入侵。

④ 成像雷达技术的发展,为目标识别创造了前所未有的机会。目前工作的合成孔径雷达分辨率已达 $1\text{m}\times1\text{m}$, $0.3\text{m}\times0.3\text{m}$ 的系统已研制成功,为大面积实时侦察与目标识别创造了条件。多频段、多极化合成孔径雷达已投入使用。

⑤ 航天技术的发展为空间雷达技术的发展提供了广泛的机会。高功率的卫星监视雷达、空间基侦察与监视雷达、空间飞行体交会雷达等成为雷达家族新的成员。

⑥ 探地雷达是雷达发展的另一重要方向。目前已有多种体制的探地雷达,用于对地雷、地

下管道探测和高速公路质量检测等目的。树林下及沙漠下隐蔽目标的探测已取得重要的实验成果,UHF/VHF 频段的超宽带合成孔径雷达已取得突破性进展。

⑦ 毫米波雷达在各种民用系统中(如场面监视、海港及边防监视、船舶导航、直升机和无人驾驶汽车的防撞等)大显身手。欧美已开发出 77GHz 和 94GHz 的汽车防撞雷达,为大规模生产汽车雷达创造了条件。在研制的用于自动装置的雷达中,最高频率已达 220GHz。

纵观来看,当前雷达面临着所谓“四大”威胁,即快速应变的电子侦察及强烈的电子干扰;具有掠地、掠海能力的低空、超低空飞机和巡航导弹;使雷达散射面积成百上千倍减小的隐身飞行器;快速反应自主式高速反辐射导弹。因此,对雷达的要求越来越高。首先,它应减少雷达信号被电子环境监测器(ESM)、反辐射导弹(ARM)截获的概率,使雷达信号更难于被这些装置发现和跟踪。同时,雷达应保证实时、可靠地从极强的自然干扰(杂波)和人为干扰中检测大量目标。由于目标的雷达横截面积从很低值(“隐身”目标)到相当高值(大舰只、大飞机或强杂波)的范围内变化,所以还要求雷达有很大的工作动态范围和很高的虚警鉴别力,即使在多目标(如群目标袭击)环境中也如此。此外,还应当采用目标分类和威胁估计,并将被处理的数据有效地传送给电子计算机和终端录取及显示装置,且要简便易行。

“四大”威胁的出现和发展并非意味着雷达的“末日”到来。为了对付这些挑战,雷达界已经并在继续开发一些行之有效的新技术,例如图 1.1 中所列的频率、波束、波形、功率、重复频率等雷达基本参数的捷变或自适应捷变技术;功率合成、匹配滤波、相参积累、恒虚警处理(CFAR)、大动态线性检测器、多普勒滤波技术;低截获概率(LPI)技术;极化信息处理技术;扩谱技术;超低旁瓣天线技术;多种发射波形设计技术;数字波束形成技术等。对抗“四大”威胁必然是上述一系列先进技术的综合运用,而非某一单项技术手段所能奏效。在采用上述新技术的基础上,已经并正在研制各种新体制雷达,诸如,无源雷达、双(多)基地雷达、相控阵雷达、数字阵列雷达、机(或星)载预警雷达、稀布阵雷达、多载频雷达、噪声雷达、谐波雷达、微波成像雷达、毫米波雷达、激光雷达及冲击雷达等,并且与红外技术、电视技术等构成一个以雷达、光电和其他无源探测设备为中心的极为复杂的综合空地一体化探测网,充分利用联合监视网在频率分集、空间分集和能量分集上的特点,在实现坐标和时间的归一化处理基础上,达到互相补充和信息资源共享。由于提取的是来自若干传感器的信息,而不是其中一个传感器单独给出的数据,所以大大提高了系统的目标测量与识别、反隐身、抗干扰和反摧毁的能力,从而使“四大”威胁同样会面临极度的困境。这就是事物发展的规律,雷达技术和反雷达技术必将在相互斗争中前进和发展。

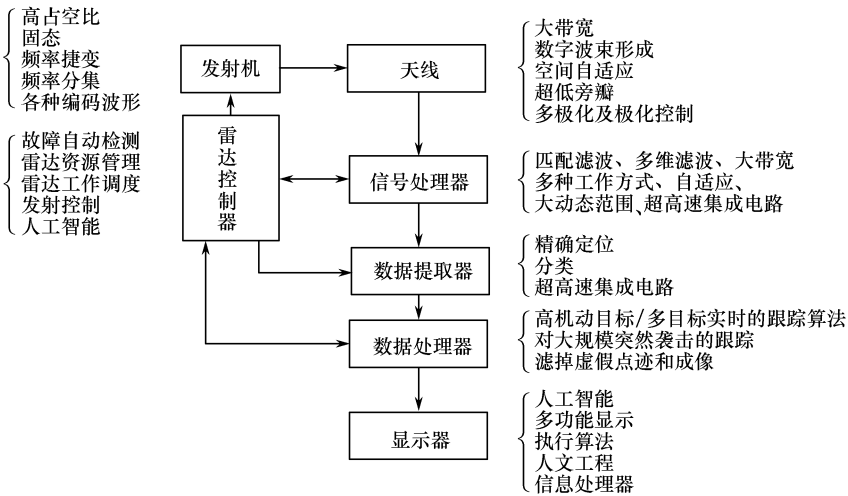


图 1.1 雷达各主要部分可采用的先进技术的归纳表示图

当前对于雷达的另一个要求是多功能与多用途。在现代雷达应用中,由于作战空间和时间的限制,加之快速反应能力的要求和系统综合性的要求,雷达必须具备多功能和综合应用的能力。例如,要求一部雷达能同时对多目标实施搜索、截获、跟踪、识别及武器制导或火控等功能;要求雷达与通信、指挥控制、电子战等功能构成综合体。它涉及综合(共享)孔径天线技术,综合射频系统技术,综合信号处理和综合数据处理技术,光电子技术以及软件无线电技术等领域的研发。

1.3 雷达的主要性能指标和技术参数^{[1]、[3]、[6]、[9]}

1.3.1 概述

典型脉冲雷达的原理框图如图 1.2 所示。按照常规雷达工程的习俗,雷达可分为 7 个分系统。在比较复杂的系统中,雷达的工作受计算机控制,由同步装置启动各个专门动作,从而控制发射时序、接收机选通和增益调整、信号处理和显示。同步装置控制调制器给射频(RF)放大器加上高压脉冲,与此同时来自激励器的 RF 激励信号加到该放大器上。由此产生的高功率射频脉冲通过传输线送往收发开关,再通过收发开关把能量送往天线向空间辐射。图中所示天线为反射面型。由伺服放大器驱动天线基座并控制其机械转动。天线起着将电磁能量耦合到大气中并接收由目标散射回来的电磁能量的作用,它通常会形成一个集中向某一给定方向传播电磁波的波束。位于天线波束内的物体或目标将会截取一部分传播的电磁能量,且将被截取的能量向各个方向散射,其中有些能量会向雷达的方向反射(反向散射),回波信号重新进入天线,并由双工器与接收机相连。由激励器过来的本振信号将回波频率变换成中频,然后在接收机中进行放大和滤波,之后进行更精细的信号处理。处理后的信号通过一个包络检测器将脉冲波形恢复,并对该波形进行显示或用于进一步的视频处理,从而发现目标并测量其位置、速度等参数。

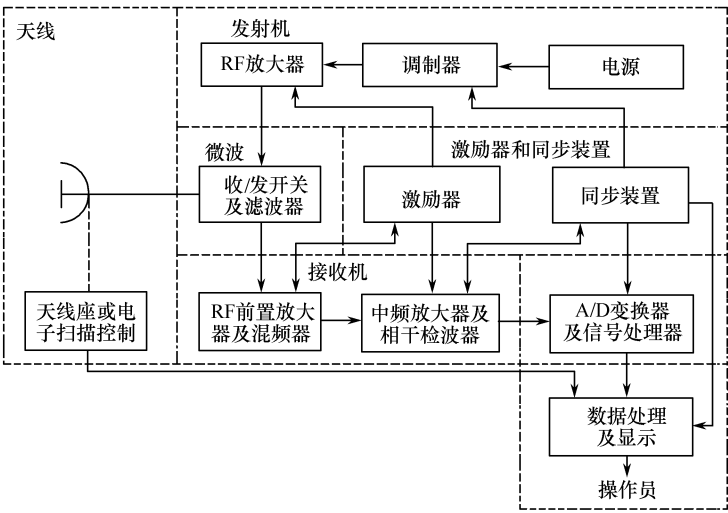


图 1.2 典型脉冲雷达的原理框图

针对具体的雷达应用,图 1.2 中的框图有许多种变化。例如,图 1.3 给出了由计算机控制的现代无源相控阵雷达系统的框图,该系统利用了无源相控阵列。雷达同步器现在是一个专门的数字硬件单元,它接收控制计算机来的信息,并将它们转换成波形选择和定时控制,以及信号处理机采样选通。激励器和调制器也在数字控制下合成载频和波形调制。控制计算机还产生波束切换和处理机选通。波控处理机控制着建立发射波束与接收波束方向与形状的移相器的设置,

接收机路径和增益设置也受计算机控制,以使由于干扰或杂波所引起的过载的机会最小。对于每次排定的雷达动作(发射和接收某一特定波束位置上的一个或多个脉冲),选择波形和接收机一处理机配置,以使性能最佳。这类雷达的成功工作,无论是在时间还是在发射机能量方面,都需要有详细的环境和可用雷达的资源的知识。

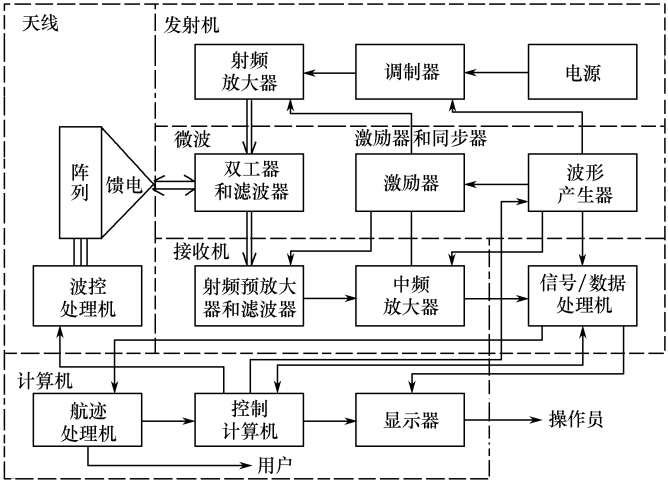


图 1.3 典型无源相控阵雷达框图^[3]

相控阵雷达近来的一种趋势是在阵列的每个单元(行、列或子阵)上放置一个收/发组件。每个组件由一个功率放大器、一个双工器和一部接收用低噪声放大器组成。有源电子扫描阵列(简称 AESA)雷达的框图如图 1.4 所示,图中给出了激励器接入阵列的馈电网络。发射机末级放大器现在位于每个单元的收/发组件中。回波信号由每个组件的低噪声放大器通过馈电网络进入主接收机。进一步的发展是将一个完整的接收机与 A/D(模数)变换器一起放在了每个组件中, A/D变换器通过一条总线将数字信号馈入含有数字波束形成功能的信号处理机中。

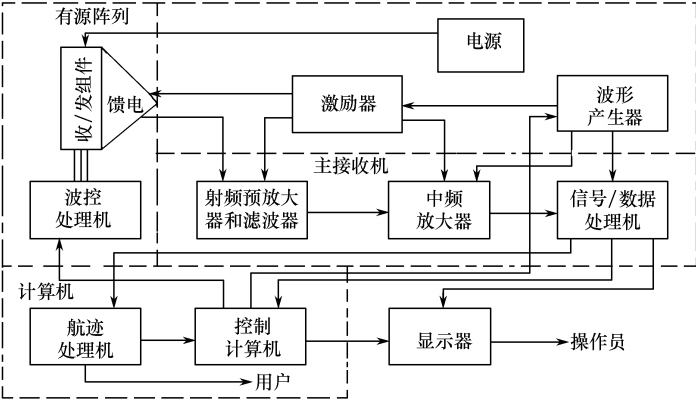


图 1.4 典型有源阵列雷达框图^[3]

图 1.5 示出了进入雷达信号管理的各单元。雷达信号处理的目的是为了检测期望回波信号和排除噪声、干扰、杂波中不期望的回波信号。它包括如下部分,详见参考文献^[11]、^[3]。

- ① 匹配滤波器:使雷达接收机输出信噪比达到最大,也就使回波信号的检测能力最大化。
- ② 检测器/积累器:用方便高效的方法处理许多来自目标区的接收脉冲,以便充分利用目标反射回的信号能量。

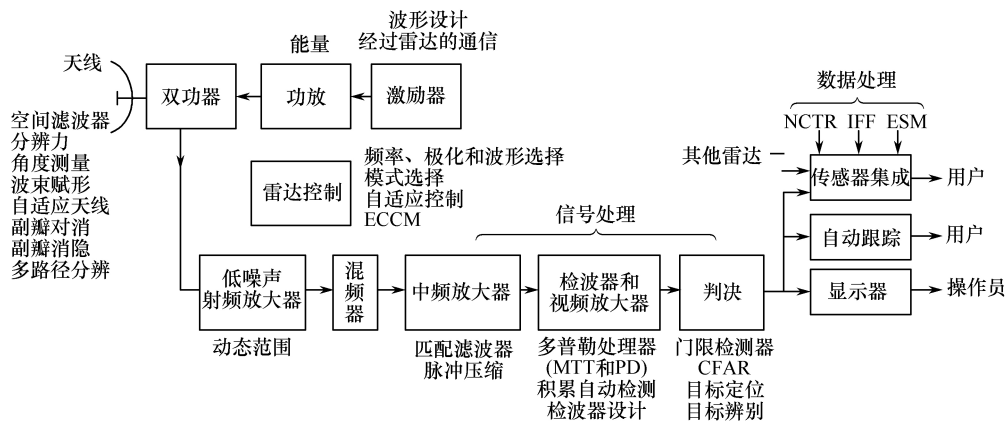


图 1.5 进入雷达信号管理的各单元

③ 减少杂波:为了消除或者减少不想要的杂波而采用的一种或几种方法。这些方法中,基于多普勒频移来滤波运动目标杂波的方法是最重要的。

④ 恒虚警:当雷达不能消除不想要的回波时,采用的在门限检测器输出端保持恒定虚警概率技术。

⑤ 电磁兼容性(EMS):消除进入雷达接收机的其他雷达和其他设备辐射的电磁辐射干扰。

⑥ 电子反干扰(ECCM):是指在军事雷达中,用来减少或消除人为干扰、欺骗和其他敌对的有源和无源的降低雷达性能的电子方法。电子反干扰措施存在于整个雷达系统中,而不只是信号处理中的一部分。

⑦ 门限检测:用来决定雷达的输出是否是期望的信号。

在上述雷达信号处理内容中,所关心的雷达信号的自动检测器包括如下内容:

- 把雷达威力区域量化为距离或角度分辨单元;
- 对距离分辨单元的输出作采样,每单元至少一个采样(实现时要多于一个);
- 在做检测判决前,在接收机中通过信号处理去掉噪声、杂波、干扰;
- 实使对每个分辨单元采样积累;
- 当接收机无法去除所有杂波和干扰时,用恒虚警率(CFAR)电路保持虚警率;
- 根据杂波图提供的杂波位置;
- 通过自动跟踪器或其他数字处理机,并利用门限检测选取作进一步处理的目标回波;
- 检测判决后进行距离和角度的测量。

有关上述雷达信号的检测与估计内容可参阅参考文献[38],详细介绍参见《雷达系统(第4版)》第2章的内容。

1.3.2 主要战术性能指标和技术参数^{[3][6][11]}

雷达的性能分为雷达的战术性能和雷达的技术性能。雷达的战术性能是指雷达完成战术任务的能力;雷达的技术性能是指雷达的技术参数。

1. 雷达作用距离方程

在“雷达原理”课程已导出雷达方程为

$$R_{\max}^4 = \frac{P_{\text{av}} G A \eta \sigma n E_i(n) F^4 e^{-2\alpha R_{\max}}}{(4\pi)^2 k T_0 F_n(B\tau) f_r(S/N)_1 L_f L_s} \quad (1-1)$$

式中, R_{\max} 为最大雷达作用距离(m); P_{av} 为平均发射机功率(W); G 为天线增益(dB); A 为天线

实际面积(m^2); η 为天线孔径效率; σ 为目标的雷达横截面积(RCS) (m^2); n 为积累脉冲数; $E_i(n) = \frac{(S/N)_1}{n(S/N)_n}$ 为积累效率; $nE_i(n)$ 为积累改善因子; F^N 为传播因子; α 为衰减系数(每单位距离奈培); k 为玻耳兹曼常数 $= 1.38 \times 10^{-23}$ (J/K); T_0 为标准温度 $= 290\text{K}$ (乘积 $kT_0 = 4 \times 10^{-21}$ W/Hz); F_n 为接收机噪声系数; B 为接收机带宽(Hz); τ 为脉冲宽度(s); $(S/N)_1$ 为只基于单个脉冲进行检测所需要的信噪比; f_r 为脉冲重复频率(Hz); L_f 为起伏损耗(对 Swerling 目标模型)(dB); L_s 为系统损耗(dB)。

式(1-1)中, 噪声系数 F_n 是指实际接收机的噪声输出与一个具有相同增益的假定“理想”最低噪声接收机的噪声输出之比, 即

$$F_n = \frac{\text{实际接收机的噪声输出}}{\text{理想接收机的噪声输出}} \quad (1-2)$$

式(1-1)中, 目标的 RCS 可以表示为

$$\sigma = 4\pi \frac{\text{单位立体角的反射波}}{\text{入射雷达波的功率密度}} \quad (1-3)$$

这是 RCS 的通用定义, 它的优点是使雷达方程式写起来更简单。若用几何截面积、反射系数及方向系数来描述的 RCS, 其意义更加明了, 可充分体现了它们之间的关系[参阅文献 6]。

式(1-1)中信号能量可表示为

$$\text{信号能量} = K_c \frac{P_{av} G \sigma A_e t_{ot}}{R^4} \quad (1-4)$$

在任意一段积累时间内, 从目标接收的能量如下:

$$\text{接收到的信号能量} \approx \frac{P_{av} G \sigma A_e t_{int}}{(4\pi)^2 R^4} \quad (1-5)$$

式中, $K_c = 1/(4\pi)^2$; A_e 为天线的有效面积 ($= A\eta$); t_{ot} 为目标驻留时间; t_{int} 为积累时间。

在常规雷达设计中, 乘积 $B\tau \approx 1$ 。平均功率表示成 $P_{av} = P_t \tau f_r = E_p f_r$, E_p 是一个发射脉冲内的能量。 n 个脉冲总的发射能量为 $E_t = nE_p$ 。矩形脉冲的信噪比可表示成能量比, 因为 $S/N = (E/\tau)/N_0 B = E/(N_0 B\tau)$, 其中, E 是接收脉冲的能量, N_0 是每单位带宽的接收机噪声功率。当 $B\tau = 1$ 时, $(S/N)_1 = (E/N_0)_1$ 。忽略传播因子、大气衰减和起伏损耗, 则探测雷达距离方程可写成

$$R_{\max}^4 = \frac{E_t G A \eta \sigma E_i(n)}{(4\pi)^2 k T_0 (E/N_0)_1 L_s} \quad (1-6)$$

这个雷达方程可应用于任何一种波形, 不只是矩形脉冲, 只要接收时采用匹配滤波器并且正确定义能量参数就行。

2. 雷达的主要战术指标

以下仅讨论雷达在单载频(未编码)脉冲工作条件下的战术性能。

(1) 雷达的探测范围

雷达对目标进行连续观测的空域, 叫做探测范围, 又称威力范围, 是对各不同仰角、方位角的探测距离之综合。它决定于雷达的最小可测距离和最大作用距离, 以及最大和最小仰角与方位角的探测范围。

(2) 测量目标参数的精确度或误差

精确度高低是以测量误差的大小来衡量的。测量方法不同精确度也不同。误差越小, 精确度越高。雷达测量精确度的误差通常可分为系统误差、随机误差和疏失误差。所以往往对测量结果规定一个误差范围, 例如, 规定距离精度 $R' = (\Delta R)_{\min}/2$; 最大值法测角精度 $\theta' = (1/5 \sim 1/10)\theta_{0.5}$, 等信号法测角精度比最大值法高, 对跟踪雷达, 单脉冲制为 $(1/200)\theta_{0.5}$, 圆锥扫

描制为 $(1/50)\theta_{0.5}$ (其中 $(\Delta R)_{\min}$ 为距离分辨力, $\theta_{0.5}$ 为半功率波束宽度)。

(3) 分辨力

这是指对两个相邻目标的区分能力。两个目标在同一角度但处在不同距离上,其最小可区分的距离 $(\Delta R)_{\min}$ 称为距离分辨力,如图 1. 6(a)所示。其定义为:在采用匹配滤波的雷达中,当第一个目标回波脉冲的后沿与第二个目标回波脉冲的前沿接近重合以致不能区分出是两个目标时,作为可分辨的极限,这个极限间距就是距离分辨力,一般认为是

$$(\Delta R)_{\min} = c\tau/2 \tag{1-7}$$

式(1-7)表明,由于光速 c 是常数,所以 τ (脉冲宽度)越小,距离分辨力越好。由此可知,为提高距离分辨力,需采用窄脉冲。例如, $\tau=1\mu\text{s}$ 时, $(\Delta R)_{\min}=150\text{m}$ 。若要求 $(\Delta R)_{\min}=15\text{m}$,则需采用 $\tau=0.1\mu\text{s}$ 的窄脉冲,如图 1. 6(b)所示。

两个目标处在相同距离上,但角位置有所不同,最小能够区分的角度称为角分辨力(在水平面内的分辨力称为方位角分辨力,在垂直面内的分辨力称为俯仰角分辨力),如图 1. 6(c)所示。它与波束宽度有关,波束越窄,角分辨力越高。

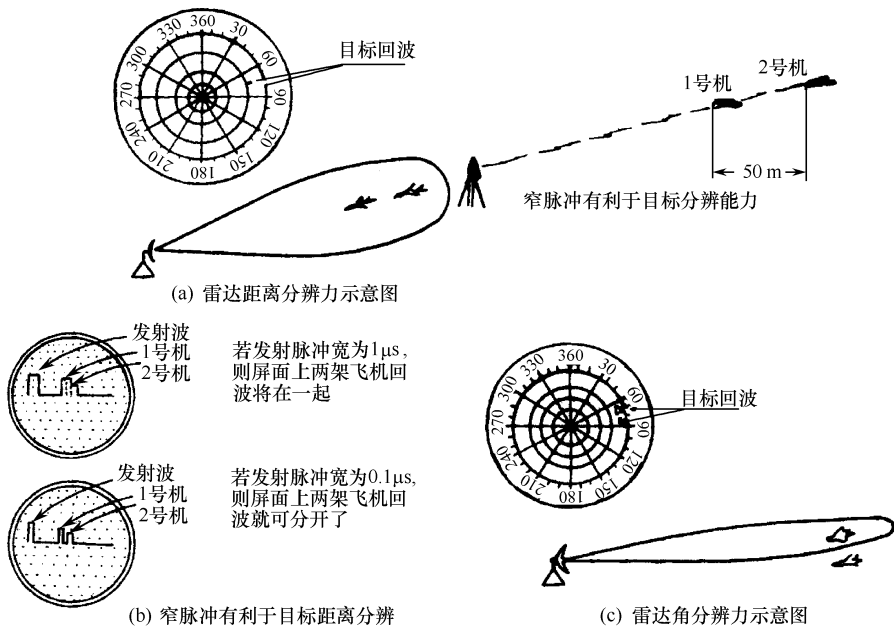


图 1. 6 雷达距离分辨力的示意图

(4) 数据率

数据率是雷达对整个威力范围完成一次探测(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对每个目标提供数据的次数,它表征着搜索雷达和三坐标雷达的工作速度。例如,一部 10s 完成对威力区范围搜索的雷达,其数据率为每分钟 6 次。

(5) 抗干扰能力

雷达通常在各种自然干扰和人为干扰(ECM)的条件下工作,其中主要是敌方施放的干扰(无源干扰和有源干扰)。这些干扰最终作用于雷达终端设备,严重时可能使雷达失去工作能力。所以近代雷达必须具有一定程度的抗干扰能力。

(6) 工作可靠性

雷达要能可靠地工作。硬件的可靠性,通常用两次故障之间的平均时间间隔来表示,称为平均无故障时间,记为 MTBF。这一平均时间越长,可靠性越高。可靠性的另一标志是发生故障

以后的平均修复时间,记为 MTTR,它越短越好。在使用计算机的雷达中,还要考虑软件的可靠性。军用雷达还要考虑战争条件下雷达的生存能力。

(7) 体积和质量

总的说来,希望雷达的体积小、质量轻。体积和质量决定于雷达的任务要求、所用的器件和材料。机载和空间基雷达对体积和质量的要求很严格。

(8) 功耗及展开时间

功耗指雷达的电源消耗总功率。展开时间指雷达在机动中的架设和撤收时间。这两项性能对雷达的机动性十分重要。

(9) 测量目标坐标或参数的数目

目标坐标是指目标的方位、斜距和仰角(或高度)。目标的参数除目标的坐标参数以外,还指目标的速度和性质(如机型、架数、敌我)。对于边扫描边跟踪雷达,还要对多批目标建立航迹,进行跟踪。此时,跟踪目标批数、航迹建立的正确率也是重要的战术指标。

3. 雷达的主要技术参数

(1) 工作频率及工作带宽

雷达的工作频率就是雷达发射机的射频振荡频率,用符号 f_0 表示。与工作频率相应的波长称工作波长。工作波长是指在射频信号的一个周期内无线电波在空间传播的距离,用符号 λ 表示。由此可见,工作频率和工作波长的乘积应等于电波在空间的传播速度 c 。

字母频段名称不能代替雷达工作的实际数字频率。采用雷达具体的数字频率总是合适的,但当希望用短符号表示时就应当采用表 1.3 所示的字母命名。

表 1.3 IEEE 标准雷达频率字母频段名称* [1]

频 段 命 名	标称频率范围	依据 ITU,在第二栏中分配的专用的雷达频率范围
HF	3~30MHz	
VHF	30~300MHz	138~144MHz 216~225MHz
UHF	300~1000MHz	420~450MHz 850~942MHz
L	1~2GHz	1215~1400MHz
S	2~4GHz	2300~2500MHz 2700~3700MHz
C	4~8GHz	5250~5925MHz
S	8~12GHz	8500~10680MHz
Ku	12~18GHz	13.4~14.0GHz 15.7~17.7GHz
K	18~27GHz	24.05~24.25GHz
Ka	27~40GHz	33.4~36GHz
V	40~75GHz	59~64GHz
W	75~110GHz	76~81GHz 92~100GHz
MM	110~300GHz	126~142GHz 144~149GHz 231~235GHz 238~248GHz

* 来自“IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Band”, IEEE Std 521-1984.

雷达的工作频率主要根据目标的特性、电波传播条件、天线尺寸、高频器件的性能、雷达的测量精确度和功能等要求来决定。工作带宽主要根据抗干扰的要求来决定。一般要求工作带宽为工作中心频率的 5%~10%，超宽带雷达为 25%以上。

传播与分辨力的频率依赖性导致对利用不同波段的优先选择和限制，如表 1.4 所示。当然，在许多情况下使用的波段得到了扩展，例如，在 L 波段采用很大的天线和针对电离层传播效应的补偿来提供精确跟踪，或者采用抑制雨杂波干扰的专门多普勒处理和用高功率克服大气衰减以及有限孔径尺寸在 C 波段或 X 波段进行搜索。不过，一旦雷达波段、雷达的总尺寸和功率建立了起来，搜索和跟踪功能的潜力就会受到极大的制约。

表 1.4 雷达频段用法^[1]

频 段	用 法
HF	超视距雷达，以实现很远的作用距离，但具有较低的空间分辨力和精度
VHF 和 UHF	远程视线监视(200~500km)，具有中等分辨力和精度，无气象效应
L 波段	远程监视，具有中等分辨力和适度气象效应
S 波段	中程监视(100~200km)和远程跟踪(50~150km)，具有中等精度，在雪或暴雨情况下有严重的气象效应
C 波段	近程监视、远程跟踪和制导，具有高精度，在雪或中雨情况下有更大气象效应
X 波段	明朗天气或小雨情况下的近程监视；明朗天气下高精度的远程跟踪，在雨条件下减为中程或近程(25~50km)跟踪
Ku 和 Ka 波段	近程跟踪和制导(10~25km)，专门用在天线尺寸很有限且不需要全天候工作时，更广泛应用于云雨层以上各高度的机载系统中
V 波段	当必须避免信号在较远距离上被截获时，用于很近距离跟踪(1~2km)
W 波段	很近距离跟踪和制导(2~5km)
更高 MM 波段	很近距离跟踪和制导(<2km)

(2) 发射功率

发射功率的大小影响作用距离，对于相同的发射脉冲串，若发射功率大则作用距离大。发射功率分脉冲功率和平均功率。雷达在发射脉冲信号期间所输出的功率称脉冲功率，用 P_t 表示；平均功率是指一个重复周期 T_r 内发射机输出功率的平均值，用 P_{av} 表示。它们的关系为

$$P_{av} = P_t \tau / T_r \tag{1-8}$$

式中， $P_t \tau$ 为发射机的脉冲能量，它是发射机的脉冲功率与脉冲宽度的乘积。要增大雷达的探测距离，既要依靠高脉冲功率，但又不能单纯依靠它，因为高频大功率的产生受到器件、电源容量和效率等因素限制。一般远程警戒雷达的脉冲功率为几百千瓦至兆瓦量级，中、近程火控雷达为几千瓦至几百千瓦量级。

(3) 调制波形、脉冲宽度和重复频率

早期雷达发射信号采用单一的脉冲波形幅度调制，现代雷达则采用多种调制波形以供选择。

脉冲宽度指发射脉冲信号的持续时间，用 τ 表示。一般在 $0.05 \sim 20 \mu s$ 之间，它不仅影响雷达探测能力，还影响距离分辨力。早期雷达的脉冲宽度是不变的，现代雷达常采用多种脉冲宽度的信号以供选择。当采用脉冲压缩技术时，发射脉冲时宽度可达数百微秒。

脉冲重复频率指雷达每秒发射的射频脉冲的个数，用 f_r 表示。脉冲重复频率的倒数叫脉冲重复周期，它等于相邻两个发射脉冲前沿的间隔时间，用 T_r 表示。雷达的脉冲重复频率 f_r 一般在 $50 \sim 2000 \text{ Hz}$ 之间(相应的 T_r 为 $20000 \sim 500 \mu s$)。它们既决定了雷达单值测距范围，又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。

(4) 天线的波束形状、增益和扫描方式

天线的功能是辐射电磁能量或接收电磁能量。天线方向图是一种辐射电场,该电场是以瞄准线波束中心为基准的角度函数。辐射图的各个部分称为波瓣,可以分为主瓣、旁瓣和后瓣。主瓣被定义为含有最大辐射方向的波瓣。旁瓣是指非指定的任意方向辐射的波瓣。后瓣是指位于主瓣相反方向范围内的波瓣。旁瓣电平通常被表示为需探究波瓣的功率密度与主瓣的功率密度之比。

一般来说,人们感兴趣的是辐射方向图的三个特征:主瓣宽度、主瓣增益及旁瓣相对强度。

天线的辐射强度是每个单位立体角内的功率。天线主瓣的功率增益被定义为最大方向的辐射强度与天线接收来自发射机的净功率比的 4π 倍。可以用 Kraus 近似法估计出天线增益的近似表示为

$$G = \eta \frac{4\pi}{\theta_\alpha \theta_\beta} = \eta G_D \quad (1-9)$$

式中, θ_α 是方位面的半功率波束宽度(弧度); θ_β 是俯仰面的半功率波束宽度(弧度); G_D 是天线方向性系数; η 是天线孔径辐射效率

$$\eta = p_{\text{rad}} / p_{\text{in}} \quad (1-10)$$

即 η 是天线辐射功率 p_{rad} 与总的输入功率 p_{in} 之比。半功率波束宽度是其辐射强度为最大波束值的一半的两个方向之间的夹角。也可以用实际孔径面积 A 把天线增益近似表示成

$$G \approx \frac{4\pi\eta A}{\lambda^2} G_D \quad (1-11)$$

可见,天线实际孔径面积 A 越大,则天线的增益越大,雷达最大探测距离就越远。

对分布在孔径上的场进行傅里叶变换,可以获得任何天线孔径的天线辐射方向图。例如,矩形孔径天线的辐射方向图为

$$\theta_\alpha \theta_\beta = \frac{0.88\lambda}{d_\alpha d_\beta} \quad (1-12)$$

式中, d_α 是方位面的孔径尺寸; d_β 是俯仰面的孔径尺寸(尺寸单位同工作波长 λ 的单位)。如果孔径照射是均匀的,则辐射强度的方向图为 $(\sin x/x)^2$ 。最高旁瓣电平为 -13dB 。

➤ 波束宽度:主瓣的宽度称为波束宽度。它是波束相对的边缘之间的角度。波束通常不是对称的,因此通常要区分方位波束宽度和垂直波束宽度。米波雷达的波束宽度在 10° 量级,而厘米波雷达的波束宽度在几度。

➤ 波束形状:图 1.7(a) 示出高增益天线方向图。雷达要么采用扇形波束或余割平方波束,要么采用笔形波束。图 1.7(b) 中水平面内的笔形波束宽度等于或几乎等于垂直面内的波束宽度。其波束宽度一般小于几度,通常为 1° 。这样大小的波束宽度用于必须要有精确的位置测量和同时要有好的方位与仰角分辨力的雷达中。跟踪雷达、三坐标雷达(能测量仰角及方位和距离的转动式对空监视雷达)和许多相控阵雷达普遍采用笔形波束。

➤ 扇形波束:如图 1.7(c) 所示,其中一个角度比另一个小。在采用扇形波束的对空监视雷达中,方位波束宽度通常为 1° 或几度,而仰角波束宽度或许可以是方位波束宽度的 $4\sim 10$ 倍。在要搜索大空域的二维(距离和方位)对空监视雷达中也可见到扇形波束。窄波束宽度是在水平坐标内的,以便获得精确的方位角测量。采用宽仰角波束宽度是为了获得良好的仰角覆盖,但牺牲了精确的仰角测量。

简单的笔形波束在搜索大角度空域方面有困难。采用大量扫描的笔形波束(如 $3\sim 9$ 个)可解决这一问题,这在一些三坐标雷达中可以看到。有时在三坐标雷达中,在垂直方向采用叠层波束覆盖。这种叠层波束由许多邻接的固定笔形波束组成,如图 1.7(d) 所示。以往通常采用 $6\sim 16$ 个邻接波束。

通常,要对扇形波束的形状进行修正以获得更完整的覆盖。一个余割平方波束示意图,如图 1.7(e)所示。

顺便提及一下,在二维搜索雷达中,所需的覆盖方向图通常如图 1.7(f)所示,其中远波瓣覆盖了从地平线到 θ_1 的角度,而增宽的主瓣边缘则扩展至 θ_2 。为了得到恒定高度从 θ_1 和 θ_2 的探测等高线,天线增益的方程式如下:

$$G(\theta)=G(\theta_1)\frac{\csc^2\theta_2}{\csc^2\theta_1},\quad (\theta_1<\theta<\theta_2) \tag{1-13}$$

因为能量被分散到上方仰角,与宽度为 θ_1 的简单扇形波束的增益 G_m 相比,得到的余割平方天线方向图在 $\theta<\theta_1$ 范围内的峰值增益 G_{cs} 有所降低。通过对上部分能量的积分,可发现

$$G_{cs}=\frac{G_m}{L_{cs}}=\frac{G_m}{2-\theta_1\cot\theta_2}=G_m\eta_{cs} \tag{1-14}$$

式中, L_{cs} 为余割平方损耗, η_{cs} 为相应的效率因子。为了覆盖上部分,孔径效率被降低了至多 3dB (通常为 2~2.5dB)。

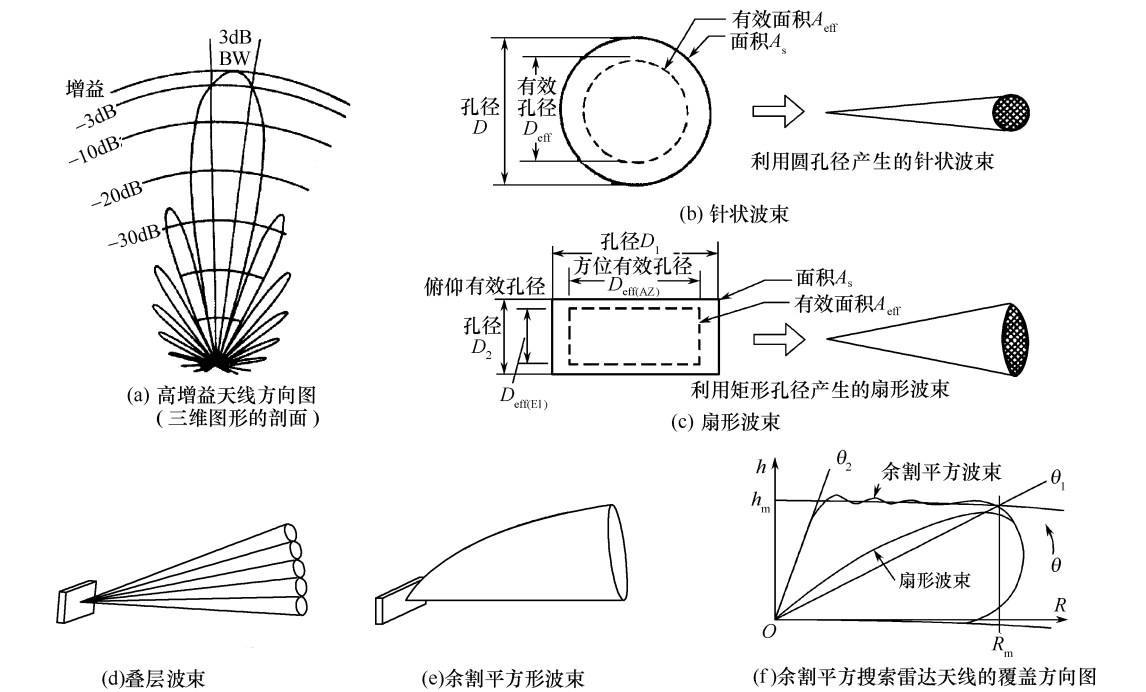


图 1.7 针状、扇形和余割平方波束的示意图

➤ 波束边缘: 由于随着偏离波束中心角度的增加,主瓣值越来越下降,为了使波束宽度的任何值都具有意义,必须规定什么是波束的边缘。

或许最容易定义的波束边缘是主瓣两边的零点。但是,从雷达工作的角度看[图 1.7(a)],更现实的定义是把波束边缘定义为功率下降到波束中央功率某任意选定的分数值的点。最常用的分数值是 1/2。用分贝表示的话,1/2 是 -3dB。因此,在这些点之间测出的波束宽度称为 3dB 波束宽度(BW)。

➤ 带宽: 天线的带宽被定义为天线性能符合规定标准的频率范围,通常规定为辐射中心频率周围的频率范围。

➤ 极化: 天线辐射波形的极化是描述电场矢量时变方向和相对幅度的波特征(由瞬时电场矢量画出的曲线表征),辐射极化可以是线性的、圆的或者椭圆的。

搜索和跟踪目标时,天线的主瓣在雷达的探测空域内以一定的规律运动,称为扫描,它可分为机械扫描和电扫描两大类。按照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。常规的两坐标警戒雷达一般采用机械方式的圆周扫描,炮瞄雷达在跟踪时可以采用圆锥扫描。相控阵雷达是电扫描的,波束指向由计算机决定,不要求阵列天线在空间作连续机械运动。有的雷达同时采用机械扫描和电扫描两种方式,例如有的三坐标雷达在方位上采用机械扫描,在仰角上采用电扫描。它还可以用相扫与相扫或相扫与频扫结合构成二维空间扫描。

目前,尽管有源电扫阵列(AESA)看似占优势,其实它们只是众多天线类型中的一种。不同用途雷达还采用裂缝天线、波导裂缝天线、倒喇叭天线、反射天线、微带贴片天线、螺旋天线、八木天线、对数周期天线、单极天线、偶极子天线、环天线以及简单的线天线等。与大名鼎鼎的 AESA 相比,这些类型的天线应用较广泛,应用的平台更多,频率范围也更宽。因此,在天线设计中,研究人员面临着数学与建模、电磁理论、机械灵活性、材料科学等各种技术挑战。

(5) 接收机的灵敏度

接收机的灵敏度是指雷达接收微弱信号的能力。它用接收机在噪声电平一定时所能感知的输入功率的大小来表示,通常规定在保证 50%~90%检测概率条件下,接收机输入端回波信号的最小功率作为接收机的最小可检测信号功率 $P_{r,min}$ 。这个功率越小,接收机的灵敏度越高,雷达的作用距离就越远。目前的雷达接收机灵敏度一般在 0.01~1pW 之间。

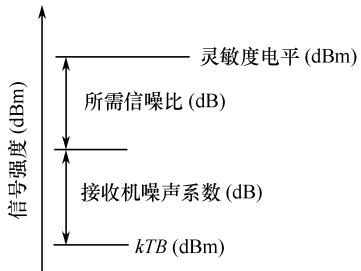


图 1.8 接收机灵敏度 (dBm) 是 kTB 、噪声系数和所需信噪比之和的示意图

根据雷达方程,通常认为接收机灵敏度与带宽、噪声系数和所需信噪比有关。如图 1.8 所示,灵敏度 (dBm) (即接收机仍保持正常工作所能接收到的最小信号电平) 是热噪声 kTB (dBm)、噪声系数 (dB) 和所需信噪比 (dB) 之和。在雷达分析中,通常将所需信噪比设定为 13dB,而 kTB 由下式计算:

$$kTB = -114\text{dBm} + 10 \log B \quad (1-15)$$

式中, B 为接收机有效带宽 (MHz)。

(6) 终端装置和雷达输出数据的形式

最常用的终端装置是显示器。根据雷达的任务和性质不同,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。

带有计算机的雷达,其显示器既是雷达的终端,又是计算机的终端,它既显示雷达接收机输出的原始信息,又显示计算机处理以后的各种数据。在半自动录取的雷达中,仍然依靠显示器来录取目标的坐标。在全自动录取的雷达中,显示器则是人工监视的主要工具。显示器和键盘的组合,常作为人与计算机对话的手段。

(7) 电源供应

功率大的雷达,电源供应是个重要的问题。特别是架设在野外无市电供应的地方,需要自己发电。电源的供应除了考虑功率容量外,还要考虑频率。地面雷达可以用 50Hz 交流电,船舶和飞机上的雷达,为了减轻质量,采用高频的交流电源,最常用的是 400Hz。

1.3.3 雷达战术、技术性能与技术参数的关系^{[9][11]}

确定雷达性能的 4 个重要指标是:检测的可靠性,目标参数估计的精度,多目标的分辨力和目标估计的模糊度。信噪比 (SNR) 影响检测的可靠性和估计的精度,信号的带宽影响所有性能

的度量,信号的波形影响估计的模糊度,而波形的重复性影响检测、估计和模糊度,上述内容将在“信号估计和检测”和“现代信号理论”两门课程^{[32]、[38]}深入介绍。

为了保证雷达的战术、技术指标得到满足,必须合理地选择雷达的基本技术参数。下面以常规雷达的波长、脉冲重复频率、脉冲宽度、天线方向图和功率增益系数、接收机通频带及发射功率等技术参数的选择为例,来说明它们对雷达战术、技术指标的影响,从中可了解到选择技术参数时会遇到许多互相矛盾的要求。因此在设计时需要进行综合分析和权衡,合理地折中解决。

1. 工作波长 λ 的选择

① 从提高接收机灵敏度来看,必须考虑所选波长下的接收机内部噪声和大气噪声的大小及电磁波在大气中的衰减,希望波长选择得长一些。

② 从提高距离分辨力、角度分辨力和天线增益的角度来看,希望波长选择得短一些。

大家知道,在单载频工作条件下距离分辨力 $(\Delta R)_{\min}$ 可用下式来表示:

$$(\Delta R)_{\min} = c\tau/2 \quad (1-16)$$

式中, c 为电波传播速度; τ 为脉冲宽度。

然而,为了保证脉冲波形的完整,通常要求

$$\tau \geq QT_{\text{hf}} \quad (1-17)$$

$$T_{\text{hf}} = \lambda/c \quad (1-18)$$

式中, T_{hf} 为高频振荡周期; Q 为高频振荡回路的品质因数。

由式(1-16)~式(1-18)可见, λ 越短, T_{hf} 就越小, τ 也可做得较窄,因而可提高距离分辨力。

至于角度分辨力,它与天线波束宽度 θ 有关,而 θ 由下式确定:

$$\theta = \eta_1 \lambda / D \quad (1-19)$$

式中, η_1 为与天线口径场分布有关的系数; D 为天线口径宽度; λ 为工作波长。由式(1-19)可见, λ 越短,则 θ 越窄,角度分辨力就越高。

另外,从提高天线增益 G 的角度来看,天线增益由下式确定:

$$G = \frac{4\pi\eta_A A_a}{\lambda^2} = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (1-20)$$

式中, $A_e = \eta_A A_a$; η_A 为天线口径面积利用系数; A_a 为天线几何面积。显然,在天线有效面积 A_e 一定的情况下, λ 越短, G 就越高。在 G 一定的情况下, λ 越短,天线的尺寸越小,便于架设、撤收,机动性能好。

③ 从雷达的用途来看,雷达的用途与波长有关,因为目标的散射性能与波长有关。而目标对电磁波的散射情况是:当目标尺寸远大于波长时,目标对电磁波以散射为主,以绕射为辅,目标的有效散射面积大;当目标尺寸远小于波长时,目标对电磁波以绕射为主,以散射为辅,目标的有效散射面积小。

因此,用于探测炮弹、潜艇的潜望塔等目标的雷达,以及用于测雨的气象雷达(以雨滴为目标),其工作波长相对要短。另外,从反隐角度看,波长在两个极端即米波或毫米波较好。

④ 从地面或水面的反射影响来看:水平极化的米波雷达,由于地面反射的影响,波瓣发生了分裂,雷达的探测距离在有些仰角上比自由空间增大;而在有些仰角上比自由空间减小,掌握目标情况可能出现不连续。地面反射对厘米波雷达的影响则较小,故中等作用距离的引导雷达,均采用厘米波段;作用距离较远的警戒雷达常采用分米波或米波波段。

⑤ 从杂波干扰的影响来看:这里所说的杂波干扰,是指云、雨气象干扰和地物、海浪等回波干扰。云、雨、地物、海浪等的回波显示在荧光屏上,形成了对辨识目标回波的干扰。为了便于从杂波中辨识目标,显然是输入接收机的信杂比越大越好。在目标(飞机)与云、雨相混的情况下,

由于目标(飞机)的尺寸远大于水滴的尺寸,依据目标的反射特性,显然采用大的 λ ,可以提高输入信杂比;当目标(飞机)以地物(建筑物、山峦)为背景时,由于目标(飞机)的尺寸远小于地物的尺寸,依据目标的反射特性,显然采用小的 λ 较好,但是,实践证明, λ 太小将会出现相反的效果。所以, λ 的减小是有限度的。总之,工作波长的选择,应根据雷达的用途而定。

2. 脉冲重复频率的选择

① 我们知道,常规雷达天线扫描引起的干扰背景起伏 $\left| \frac{\Delta U_a}{U_a} \right|$ 可表示为

$$\left| \frac{\Delta U_a}{U_a} \right|_{\max} = 1.43 \frac{\Omega_a}{\theta_{0.5} f_r} = \frac{1.43}{n} \quad (1-21)$$

式中, Ω_a 为天线转速; n 为可积累的脉冲数。由式(1-21)可看出,在其他参数保持一定时,为了减小天线扫描引起的背景起伏,希望重复频率 f_r 选择得高一些。

对于动目标显示雷达,“盲速” v_{rbn} 可表示为

$$v_{rbn} = n(\lambda f_r / 2) \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1-22)$$

由此可知,为使第一盲速超过被探测动目标的最大速度,也希望 f_r 选择得高一些。

另外,固定目标受外界引起的内部运动引起的背景起伏可表示为

$$\sigma_f = K_g (\sigma_{vn} / \lambda f_r) \quad (1-23)$$

式中, K_g 为由地形特点和气象条件决定的系数; σ_{vn} 为干扰背景合成信号的均方值。所以,从减小 σ_f 来看,亦希望 f_r 选择得高一些。

② 为了保证测距的单值性,脉冲重复频率又不能选择得太高。脉冲重复频率通常按下列关系式进行选择:

$$f_{r, \max I} \leq \frac{c}{(2.4 \sim 2.5) R_{\max I}}, \quad f_{r, \max II} \leq \frac{c}{(2.4 \sim 2.5) R_{\max II}} \quad (1-24)$$

式中, $R_{\max I}$ 为正常显示时的最大作用距离; $R_{\max II}$ 为动目标显示时的最大作用距离; $f_{r, \max I}$ 为正常显示时最高脉冲重复频率; $f_{r, \max II}$ 为动目标显示时最高脉冲重复频率。有时按式(1-24)两种情况求出的脉冲重复频率是不一致的,这时应折中考虑。也可采用参差脉冲重复频率的方法。

③ 在同样检测概率情况下,增加脉冲积累数可增大探测距离,而脉冲积累数可表示为

$$n = (\theta_{0.5} / \Omega_a) f_r \quad (1-25)$$

式中, $\theta_{0.5}$ 为半功率点波瓣宽度; Ω_a 为天线转速(度/秒)。可见,提高脉冲重复频率,可以增大雷达的最大探测距离。但是,脉冲重复频率的提高不是无限制的,通常应在保障最大无模糊距离大于最大探测距离的条件下来提高。

④ 从发射管所允许的最大平均功率来看,发射管的平均功率越高,则其温度上升越快。为了保障发射管能够正常地工作,必须不超过其允许的最大平均功率。因为 $P_{av} = P_t \tau f_r$ 在脉冲功率和脉冲宽度已定的情况下,平均功率随脉冲重复频率的上升而上升。当最大平均功率被限定后,就必须限定最高脉冲重复频率。在实际工作中,最高脉冲重复频率为

$$f_{r, \max} = P_{av, \max} / P_t \tau \quad (1-26)$$

3. 脉冲宽度的选择

对于脉冲宽度的选择,也应全面考虑。例如脉冲宽度越窄,则对稳定性的要求将越高;另外对于非脉冲压缩雷达而言,为了提高接收机的灵敏度,希望脉冲宽度选择得宽一些。因为要使接收机得到最佳的性能,则要求接收机通频带宽 B 为脉冲宽度 τ 的倒数,即 $B = 1/\tau$ 。而接收机灵敏度与 B 是成反比的,所以接收机灵敏度与脉冲宽度是成正比的。这样一来,从雷达的最大作用距离考虑,在其他参数不变的情况下,要提高接收机灵敏度则要增大脉冲宽度。

在雷达脉冲重复频率和脉冲功率不变的情况下,为了提高发射机平均功率(不超过允许值)来增加雷达作用距离,也希望选用较宽的脉冲。但是,为了减小杂波干扰强度,提高雷达抗杂波干扰能力,则希望脉冲宽度选择得窄一些。同时,为了提高雷达距离分辨力,也希望脉冲宽度选择得窄一些。

从雷达距离分辨力和最小作用距离的观点出发,脉冲宽度可按下列表达式选择:

$$\tau \geq (2\Delta R_{\min}/c) \text{ 或 } \tau = (2R_{\min}/c) - t_r \quad (1-27)$$

式中, ΔR_{\min} 为雷达距离分辨力; R_{\min} 为所要求的最小作用距离; t_r 为收/发开关恢复时间。

总之,在所要求的保真度一定的情况下,若脉冲宽度加宽,则接收机的通频带可以变窄,因而输出的噪声功率就小些,于是最大探测距离就增加,而且增大脉冲宽度要比增大脉冲功率容易。但是,脉冲宽度的增加,将会导致距离分辨力的下降,故脉冲宽度的增加也是有限度的。

此外,从抑制云、雾、雨、雪等气象干扰和人为的消极干扰考虑,需减小脉冲宽度,而从抑制敌机所施放的噪声干扰考虑,选择较宽的脉冲宽度,可以提高雷达抗噪声干扰的性能。

4. 天线的方向图和功率增益系数的选择

从角坐标测量的精度考虑,在天线的实际尺寸所允许的情况下,若选择天线方向图的垂直波瓣宽度 θ_α 和水平波瓣宽度 θ_β 越小,波瓣越尖锐,则角坐标的测量精度就越高。

下面,天线方向图的选择分别从水平波束、垂直波束宽度和旁瓣电平几方面来考虑。

① 水平波束的选择:以地面对空搜索雷达为例,它通常采用最大值法来测定目标方位角。为了提高方位角分辨力和减小测角误差,提高天线增益,减小干扰强度,希望水平波束选择得窄一些。但为了提高目标检测概率,要求天线每扫描一周能接收到足够多的回波脉冲数(一般要求远大于 10),则希望水平波束选择得宽一些。

当天线扫描速度保持一定时,为了减小天线扫描所引起的干扰背景起伏和减小天线尺寸,也希望采用较宽的水平波束。以地面对空搜索雷达为例,其水平波束宽度大约为 1° 左右。

在良好的信号分辨力情况下,测向的方位均方误差约为

$$\sigma_\alpha = (0.15 \sim 0.25)\theta_\alpha \quad (1-28)$$

式中, θ_α 为天线水平波束宽度。由此可得到水平波束宽度为

$$\theta_\alpha = \sigma_\alpha / (0.15 \sim 0.25) \quad (1-29)$$

当 θ_α 大于显示器亮点直径 d_0 时,最大值测向时的方位分辨力 $\Delta\alpha$ 近似等于水平波束宽度 θ_α ,即

$$\Delta\alpha \approx \theta_\alpha \quad (1-30)$$

通常 σ_α 和 $\Delta\alpha$ 都是给定的,所以, θ_α 可按式(1-29)和式(1-30)来计算。如果按式(1-29)所计算出来的 $\theta_\alpha > \Delta\alpha$,则应通过信号处理等途径来解决。为了使方位分辨力具有一定的余量,通常 θ_α 应取得略小于 $\Delta\alpha$ 。

② 垂直波束的选择:为了最有效地利用雷达发射功率,对于飞行高度为 h 的动目标,只要它位于雷达威力范围内,不论其距离远近,由该目标所反射回来的回波功率最易保持恒定。而当目标在最大高度 h_{\max} 上飞行时,其回波功率也不应小于接收机所必需的最小接收功率 $P_{r,\min}$ 。以地面对空搜索雷达为例,为了满足上述要求,常采用余割平方垂直波束。

因此对于地面搜索雷达,垂直波束宽度 θ_β 可按下式计算:

$$\theta_\beta = \beta_{\max} - \beta_{\min} \quad (1-31)$$

式中, β_{\max} 为余割平方天线波束的最大仰角; β_{\min} 为余割平方天线波束的最小仰角。

通常 β_{\max} 按下式计算:

$$\sin\beta_{\max} = h'/r' \quad (1-32)$$

式中, r' 为确保使防空系统有足够的准备时间,雷达所必需的作用距离; h' 为与 r' 相对应的目标

离地面的高度。

β_{\min} 为波束在地平线上最低的仰角,它由最远而且最低的动目标在空间的位置来确定。由于 β_{\min} 一般很小,因此, β_{\min} 可按下式近似计算:

$$\beta_{\min} \approx h_1 / R_{\max} \quad (1-33)$$

式中, h_1 为在雷达最大作用距离处的空间目标离地平线的高度; R_{\max} 为雷达最大作用距离。考虑到地球的曲率,则有

$$\beta_{\min} \approx (h_2 / R_{\max}) - (R_{\max} / 2R_e) \quad (1-34)$$

式中, h_2 为最大作用距离处的空间动目标离地表面的高度; R_e 为在标准大气折射下,地球等效半径,近似值为 8500km。有时按式(1-34) 算出的 β_{\min} 很小,需采用架高天线。

为了减小固定目标干扰强度,垂直波束下边缘应尽量地陡。

③ 天线旁瓣电平应选择得足够低,因为旁瓣电平太高,会使雷达受到严重的有源和/或杂波干扰,同时也会造成能量的分散。但天线实现低旁瓣有一定技术困难,所以应根据实际要求予以折中考虑。一般而言,第一旁瓣电平与主瓣电平之比应小于 -20dB 以上,对于低旁瓣天线,则要求做到小于 -30dB 或 -35dB 以上。

④ 波瓣图的形状,应根据雷达的战术用途来选择。精密跟踪雷达,选择 θ_β 、 θ_α 均小的针状波束;测高雷达选择 θ_β 小、 θ_α 大的扇形波束;搜索雷达常采用余割平方波束。

⑤ 天线功率增益系数按式(1-9) 确定:

$$G = \eta G_D \quad (1-35)$$

式中, η 为孔径辐射效率,一般可取为 0.6 左右; G_D 为天线方向性系数,它可按式确定:

$$G_D = \frac{4\pi}{\theta_\alpha \theta_\beta} \quad (1-36)$$

式中, θ_β 为垂直波束宽度; θ_α 为水平波束宽度。

5. 接收机噪声系数和通频带的确定

雷达接收机接收微弱信号的能力,通常用最小门限信号功率来描述。最小门限信号功率(接收机门限灵敏度)可按下式计算:

$$P_{r,\min} = kT_0 F_n B M \quad (1-37)$$

式中, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{W} \cdot \text{s} / ^\circ$; 标准温度 $T_0 = 290\text{K}$; $kT_0 = 4 \times 10^{-21} \text{W/Hz}$; F_n 为接收机噪声系数(噪声系数的大小,是雷达接收微弱信号的主要性能指标,噪声系数小,说明接收机内部噪声小,因此雷达作用距离就远); B 为接收机通频带宽; M 为识别系数,识别系数是系统综合性能指标,它与显示器类型、回波积累数、操作员水平等多种因素有关。

为了求 $P_{r,\min}$,则必须先求出 F_n 、 B 和 M 。下面我们仅介绍 F_n 和 B 的一般计算方法,识别系数 M 与接收机中的中频、视频带宽有关,还与脉冲积累、天线波束、显示器等有关,在此不做论述。

① 接收机噪声系数的确定。例如,对于图 1.9 所示的接收机框图,在中频增益较高时,总的噪声系数可近似表示为

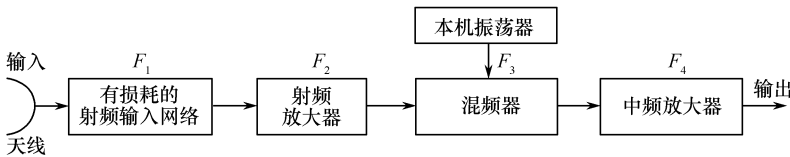
$$F_n = F_1 + (F_2 - 1)/G_1 + (F_3 - 1)/G_1 G_2 + \dots \quad (1-38)$$

式中,各参数如图中所标志,其中 L_n 、 F_1 和 G_1 分别为有损耗的射频输入网络的损耗、噪声系数和传输衰减系数; F_2 、 G_2 分别为射频放大器的噪声系数和增益; L_c 为混频器的变频损耗; N_R 为有效噪声温度同标准噪声温度之比; F_{IF} 、 G_{IF} 分别为第一级中放的噪声系数和增益。测出或计算出上述参数即可确定噪声系数 F_n 。

② 接收机通频带的确定。对于非脉冲压缩雷达,接收机最佳通频带为

$$B_{\text{opt}} = \begin{cases} 1/\tau_1 & \text{动目标显示时} \\ 1/\tau_2 & \text{正常显示时} \end{cases} \quad (1-39a)$$

$$(1-39b)$$



$$G_1 = 1/L_n, G_2 = G_{RF}, G_3 = 1/L_C, G_4 = G_{IF}$$

$$F_1 = L_n, F_2 = F_{RF}, F_3 = L_C N_R, F_4 = F_{IF}$$

图 1.9 影响接收机总噪声系数的因素的概念图

式中, τ_1 为动目标显示时的脉冲宽度; τ_2 为正常显示时的脉冲宽度。对于脉冲压缩雷达, 一般选择 $B_{opt} = B$, B 为脉压波形的带宽。

为了使非相参雷达接收机在高频振荡器和本振频率产生一定漂移时也能稳定地接收信号, 则接收机通频带还需考虑一定的裕量。当采用自动频率微调时, 这一裕量应等于自动频率微调系统误差的两倍。一般自动频率微调系统的误差为 0.25MHz 左右, 所以, 这时接收机总通频带为

$$B_{ov} = B_{opt} + \Delta f' \quad (1-40)$$

式中, $\Delta f'$ 为接收机附加通频带, 一般为 0.5MHz。

6. 发射机脉冲功率的计算

例如, 若天线采用扇形波束, 则发射机脉冲功率 P_t 可按下式计算:

$$P_t = \frac{64\pi^3 R_{\max}^4 P_{r,\min}}{L_{tr} L_r G^2 \lambda^2 \sigma F_t^2 F_r^2} \quad (1-41)$$

式中, R_{\max} 为雷达最大作用距离; $P_{r,\min}$ 为接收机门限灵敏度; L_{tr} 为发射机到天线的传输衰减系数, 如为 0.9; L_r 为天线到接收机的传输衰减系数; F_t 为从发射天线到目标的传播因子^①; F_r 为从目标到接收天线的传播因子; G 为天线功率增益; λ 为雷达工作波长; σ 为目标有效散射截面积。

假如天线采用余割平方波束, 则在相同的作用距离情况下, 所需的发射机脉冲功率 $P_{t,csc}$, 除上述参数外, 还需考虑天线垂直波束宽度 θ_β 和余割平方波束最低的仰角 β_{\min} 等参数。则所需要的平均发射功率为

$$P_{av} = P_t \tau f_r \quad (1-42)$$

7. 雷达波形的选择

雷达波形的选择有赖于雷达探测的目标类型、目标的周围环境, 以及要提取的目标信息。在一般情况下, 雷达的信号波形应当能够同时满足以下的要求: ①具有足够的能量, 以保证发现目标和准确地测量目标的参数; ②具有足够的目标分辨力; ③对于不需要的回波, 有良好的抑制能力。

例如, 最近 20 年研制的低截获概率(LPI)雷达波形有频率调制和相位编码波形、脉冲编码的大时带积连续波形及随机信号波形等, 这些往往通过发射长持续时间/低功率的信号来降低其被发现的可能性。

雷达有各种不同的用途, 满足一切用途和要求的波形是不存在的。所以, 信号波形的设计, 要按照雷达的实际用途和具体要求来决定。多用途的雷达, 则常常有多种可用的信号波形, 根据工作的需要随时加以变换, 以达到最佳的工作效果。

图 1.10 概括了已广泛使用的雷达波形类型(部分只画出其包络)。

① 传播因子定义为在天线最大值方向上目标处于同一位置情况下, 与自由空间相比场强的损耗。

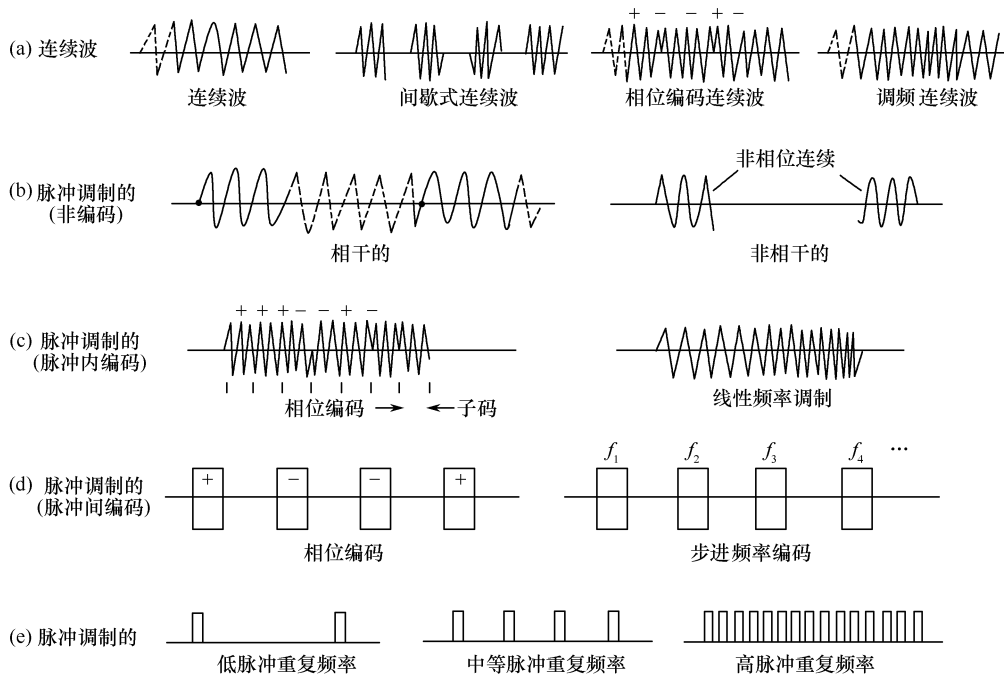


图 1.10 雷达波形的主要类型的示意图

对于监视雷达,几乎常常需要图 1.10(b)左边所示的相干脉冲串波形。另外,还采用一些复杂的脉冲串波形,其参数是可变的,可变参数有:①单个脉冲内的调制,包括宽度、幅度、相位或频率的调制;②脉冲间的频率步进;③脉冲间的相位变化;④脉冲间的间隔变化等。图 1.11 所示为一些可变参数的示意图(只画出波形的包络)。在最新设计的雷达系统中,通常有 10 种或更多的适合地面监视和边扫描边跟踪系统的波形,而机载火控雷达系统可能有 25 种以上的波形。

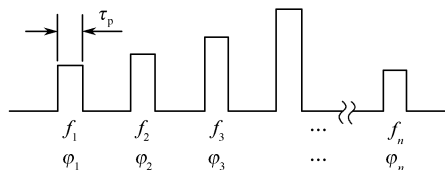


图 1.11 脉冲串的可变参数的示意图

表 1.5 列出了目前常用雷达信号的种类及特点,在此不再一一论述。

表 1.5 常用雷达信号的种类及特点

信号种类	信号特点	备注
简单脉冲信号	载频、重复频率和脉冲宽度不变或慢速变化	早期雷达常用信号
PRI 捷变信号	脉冲重复间隔 PRI(脉冲间或脉冲组间)迅速变化,包括 PRI 参差、PRI 滑变和 PRI 抖动等多种形式	用于动目标显示、脉冲多普勒和仰角扫描等雷达
频率捷变信号	信号载频(脉冲内、脉冲间或脉冲组间)快速变化	用于雷达抗干扰的频率捷变雷达
频率分集信号	同时或接近同时发射的具有两个以上载频的信号	用于雷达抗干扰的多频雷达
极化捷变信号	射频信号的极化方式(脉冲内、脉冲间或脉冲组间)快速变化	用于雷达抗干扰的极化方式迅速变化的信号
双脉冲信号	在每个 PRI 内有两个相邻(间距通常为其脉冲宽度的若干倍)的脉冲	通常用于抗回答式干扰信号