

# 雷达原理

*The Theory of Radar*

承德宝 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 雷达原理

承德宝 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

雷达原理 / 承德宝编著. —北京: 国防工业出版社,  
2008.7

ISBN 978 - 7 - 118 - 05641 - 9

I. 雷... II. 承... III. 雷达—基本知识 IV. TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 040401 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787 × 1092 1/16 印张 27½ 字数 688 千字

2008 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 50.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

## 前 言

随着雷达技术的不断发展,越来越多的新技术被成功应用,致使雷达的战术技术性能得到很大的提高。这些技术主要表现在采用了平板隙缝阵列和相控阵天线;主振放大链发射机;高频稳频频率合成器;数字接收机;全相参、目标多维信息提取和处理技术;多目标跟踪和参数录取技术;光栅扫描显示器等。为了使雷达能够在复杂的电磁环境中有效地工作,现代雷达都应当具有干扰侦察、处理、决策、控制和对抗的能力。并且已经成为现代雷达不可缺少的组成部分。也就是说,现代雷达不仅仅是天线、接收、发射和终端显示,还必须具有雷达电子对抗系统。总之,现代雷达应当具备电子对抗作战能力,包括雷达、雷达抗干扰、积极主动的干扰和电子对抗作战管理控制系统,否则它将没有生命力。

国内已出版的介绍雷达原理的图书,涉及到的雷达新技术较少,更没有雷达对抗方面的内容,因此,我们重新编撰并出版的《雷达原理》,以新的概念来理解和认识当前的雷达系统。

本书共分9章,即概述、雷达天馈系统、主振功率放大链发射机、频率合成器、数字接收机、数字信号处理机、数据处理机、光栅扫描显示器、雷达对抗系统。

本书内容深入浅出,以阐明组成和工作原理为主,比较适合从事雷达研究设计的工程技术人员阅读,可以作为大专院校电子和信息工程专业的教科书或选修教材,也可以作为技术培训教材。

参加编撰人员:承德宝、尹自生、侯为民、高玉良、董文锋、张荣华、朱元清、胡林华、秦开兵、杨加功、李延辉、李海鸿、蔺向明。

全书由承德宝审阅,并进行了修改。

由于编写时间仓促,水平有限,如遇到差错之处,敬请读者指正。

编著者  
2008年6月

# 目 录

<b>第1章 概述</b> .....	1
1.1 现代脉冲雷达系统的组成和工作过程 .....	1
1.2 雷达工作频段的划分 .....	4
1.3 雷达主要战术技术参数 .....	5
1.3.1 雷达主要战术参数和定义 .....	5
1.3.2 雷达主要技术参数和定义 .....	6
参考文献.....	7
<b>第2章 雷达天线伺服系统</b> .....	8
2.1 概述 .....	8
2.1.1 雷达天线的功用和分类.....	8
2.1.2 雷达天线的基本参量 .....	8
2.2 线天线.....	13
2.2.1 对称振子天线 .....	13
2.2.2 折合振子 .....	14
2.2.3 离散元天线阵 .....	15
2.2.4 地面对天线性能的影响 .....	23
2.2.5 其他实用线天线.....	25
2.3 面天线.....	29
2.3.1 面天线的类型 .....	30
2.3.2 前馈抛物面天线.....	30
2.3.3 扇形波瓣 .....	34
2.3.4 馈源 .....	36
2.4 平板缝隙天线.....	37
2.4.1 巴俾涅原理 .....	37
2.4.2 理想缝隙天线 .....	39
2.4.3 矩形波导缝隙天线 .....	41
2.5 无源相控阵天线.....	45
2.5.1 概述 .....	45
2.5.2 相位扫描直线阵.....	46
2.5.3 平面相控阵 .....	48
2.5.4 辐射单元 .....	50
2.5.5 移相器 .....	51
2.5.6 相控阵天线的馈电方式 .....	51

2.6	有源相控阵天线	53
2.7	雷达天线的发展方向	55
2.8	雷达天线的伺服系统	55
2.8.1	雷达伺服元件	55
2.8.2	可控硅-直流电动机构成的天线伺服系统	56
2.8.3	变频调速器-交流异步电动机构成的天线伺服系统	57
2.8.4	方位变换电路	62
2.8.5	数字式测速元件	64
	参考文献	64
<b>第3章</b>	<b>雷达发射机</b>	<b>65</b>
3.1	概述	65
3.1.1	雷达发射机的任务	65
3.1.2	雷达发射机的基本组成	65
3.1.3	雷达发射机的主要技术参数	67
3.1.4	雷达发射信号的形式	70
3.1.5	雷达发射机的发展	73
3.2	主振放大式发射机	73
3.2.1	性能与组成	73
3.2.2	特点	75
3.3	脉冲调制器	76
3.3.1	刚性开关脉冲调制器	77
3.3.2	软性开关脉冲调制器	79
3.4	固态发射机	80
3.4.1	发展概况和特点	80
3.4.2	固态微波功率的产生	81
3.4.3	固态高功率放大器模块	85
3.4.4	固态微波系统设计	86
3.5	发射机系统设计	92
3.5.1	发射机系统设计	93
3.5.2	固态发射机的应用	95
	参考文献	97
<b>第4章</b>	<b>频率合成器</b>	<b>98</b>
4.1	频率合成技术发展概况	98
4.2	频率合成器的主要技术指标	99
4.3	直接频率合成(DS)技术	100
4.3.1	直接频率合成器组成及工作原理	101
4.3.2	混频器组合频率分量图的使用	102
4.3.3	直接频率合成方法举例	104
4.4	间接频率合成(IS)技术	106
4.4.1	锁相环工作原理	106

4.4.2	锁相环各个部件的作用	107
4.4.3	锁相环的相位模型	108
4.4.4	锁相环的频率跟踪与捕获性能	111
4.4.5	锁相环频率合成器的稳定性问题	112
4.4.6	锁相环频率合成器的杂散分析	112
4.4.7	锁相环频率合成器的相位噪声分析	113
4.4.8	锁相环频率综合合成方法	115
4.4.9	低相噪、低杂波数字锁相环路滤波器设计	118
4.5	直接数字频率合成(DDS)技术	122
4.5.1	直接数字频率合成的工作原理	122
4.5.2	直接数字频率合成技术的特点	125
4.5.3	直接数字频率合成输出信号的频谱分析	126
4.5.4	直接数字频率合成频谱纯度(降低杂散)的方法	131
4.6	三种基本频率合成技术的特点及其性能比较	133
4.6.1	直接频率合成(DS)的技术特点	133
4.6.2	间接频率合成(IS)的技术特点	134
4.6.3	直接数字频率合成(DDS)的技术特点	134
	参考文献	135
<b>第5章</b>	<b>雷达接收机</b>	<b>136</b>
5.1	雷达接收机的组成	136
5.1.1	收/发开关	136
5.1.2	高频放大器	137
5.1.3	混频器	139
5.1.4	微波振荡源	140
5.1.5	中频放大器	143
5.1.6	检波器和视频放大器	144
5.1.7	接收机的功能控制电路	144
5.2	接收机的主要技术参数	151
5.2.1	灵敏度	151
5.2.2	接收机的工作频带宽度	151
5.2.3	工作稳定性和频率稳定性	151
5.2.4	动态范围	151
5.2.5	抗干扰能力	152
5.3	接收机噪声系数及灵敏度	152
5.3.1	接收机噪声系数	152
5.3.2	接收机灵敏度	154
5.4	最佳通频带和通频带的选择	155
5.4.1	最佳通频带	155
5.4.2	接收机通频带的选择	156
5.5	雷达接收机数字直接中频采样和正交相干检波器	156

5.5.1	传统正交相干检波的误差分析 .....	156
5.5.2	中频采样原理及 A/D 变换器的特性 .....	157
5.5.3	中频正交相干检波原理及实现方法 .....	162
	参考文献 .....	170
<b>第 6 章</b>	<b>雷达信号处理</b> .....	<b>171</b>
6.1	空间滤波的基本理论 .....	172
6.1.1	阵列信号模型 .....	172
6.1.2	空间滤波的基本方法 .....	174
6.1.3	自适应旁瓣对消处理 .....	180
6.1.4	数字波束形成 (DBF) 技术 .....	185
6.2	匹配滤波与最佳检测 .....	188
6.2.1	白噪声背景下的匹配滤波 .....	189
6.2.2	色噪声背景下的匹配滤波 .....	190
6.2.3	雷达信号的最佳检测原理 .....	194
6.3	动目标显示和动目标检测 .....	198
6.3.1	MTI 处理的基本原理 .....	198
6.3.2	动目标检测 .....	204
6.4	杂波控制 .....	207
6.4.1	杂波图的一般概念 .....	207
6.4.2	杂波轮廓图通道选择处理 .....	209
6.4.3	杂波自动增益控制 .....	211
6.5	恒虚警处理 .....	213
6.5.1	奈曼 - 皮尔逊准则及杂波模型 .....	213
6.5.2	噪声恒虚警处理 .....	218
6.5.3	杂波恒虚警率处理 .....	220
6.6	PD 体制雷达信号处理简介 .....	226
6.6.1	脉冲多普勒雷达的基本原理 .....	227
6.6.2	距离波门脉冲多普勒信号数字处理 .....	230
6.6.3	成组滑动脉冲多普勒信号数字处理 .....	231
6.7	脉冲压缩处理 .....	233
6.7.1	用于脉冲压缩的几种信号 .....	234
6.7.2	脉冲压缩处理 .....	240
6.7.3	数字脉冲压缩工程实现实例 .....	250
	参考文献 .....	253
<b>第 7 章</b>	<b>雷达数据处理机</b> .....	<b>254</b>
7.1	雷达信号检测技术 .....	255
7.1.1	最佳检测器 .....	255
7.1.2	实用检测器 .....	260
7.2	目标参数录取技术 .....	267
7.2.1	雷达信息录取的基本原理 .....	267



7.2.2	目标数据的录取方式	270
7.2.3	雷达坐标参数的录取方式	271
7.2.4	录取目标数据的传送方式	279
7.3	单目标跟踪技术	279
7.3.1	角度跟踪技术	280
7.3.2	距离跟踪技术	288
7.3.3	速度跟踪技术	289
7.4	多目标跟踪技术	291
7.4.1	引言	291
7.4.2	目标状态滤波技术	301
7.4.3	数据关联技术	312
7.4.4	航迹质量管理技术	322
7.4.5	相控阵雷达有源跟踪技术	325
7.4.6	信息融合技术	328
	参考文献	330
<b>第8章</b>	<b>雷达显示器</b>	<b>332</b>
8.1	概述	332
8.2	典型的雷达显示画面	333
8.2.1	A型显示器	333
8.2.2	J型显示器	333
8.2.3	B型显示器	333
8.2.4	H型显示器	333
8.2.5	PPI型显示器	334
8.2.6	典型机载火控雷达B型显示器画面	334
8.3	显示器件	337
8.3.1	阴极射线管	338
8.3.2	液晶显示器(LCD)	350
8.3.3	等离子体显示器(PDP)	352
8.3.4	显示性能及特征比较	353
8.4	光栅扫描显示器组成和工作原理	356
8.4.1	光栅扫描显示器组成和工作过程	357
8.4.2	雷达接口信息处理工作原理	362
8.4.3	雷达光栅扫描显示的若干问题	364
8.5	基于通用计算机和显示卡的光栅扫描显示器	365
8.5.1	显示系统的组成	366
8.5.2	现代雷达显示器的发展	366
	参考文献	370
<b>第9章</b>	<b>雷达综合电子对抗系统</b>	<b>371</b>
9.1	雷达综合电子对抗系统的基本组成	371
9.1.1	雷达综合电子对抗系统的基本组成	371

9.1.2	系统工作过程 .....	372
9.2	辐射源侦察系统 .....	372
9.2.1	辐射源侦察系统的组成及主要指标 .....	372
9.2.2	测频接收机 .....	375
9.2.3	测向接收机 .....	382
9.2.4	信号脉内特征分析器 .....	388
9.2.5	信号处理机 .....	392
9.3	有源干扰机 .....	398
9.3.1	有源干扰机的组成及效能评估 .....	398
9.3.2	压制性干扰 .....	402
9.3.3	欺骗性干扰 .....	410
9.4	无源干扰设备 .....	416
9.4.1	箔条干扰 .....	416
9.4.2	无源假目标 .....	418
9.5	导弹逼近告警设备及诱饵雷达 .....	419
9.5.1	导弹逼近告警设备及诱饵雷达的作用 .....	419
9.5.2	反辐射导弹及其特点分析 .....	420
9.5.3	导弹逼近告警设备 .....	422
9.5.4	雷达诱饵 .....	423
9.6	雷达对抗控制管理系统 .....	426
9.6.1	雷达对抗控制管理系统的基本组成及工作 .....	427
9.6.2	综合数据处理 .....	428
9.6.3	雷达威胁环境分析及自卫 .....	428
9.6.4	电磁环境分析及雷达工作状态控制 .....	429
	参考文献 .....	430

# 第1章 概述

## 1.1 现代脉冲雷达系统的组成和工作过程

随着雷达技术的飞速发展,越来越多的新技术被成功应用,致使雷达的战术技术性能得到很大的提高。为了能够使雷达在复杂的电磁环境中有效地工作,现代雷达不仅具备多种抗干扰措施和积极的干扰装备,而且还有干扰侦察、处理、决策、控制和对抗管理系统。也就是说,现代雷达不仅仅包含天线、接收、发射和终端显示,它还包含电子对抗所必须的分系统。

现代脉冲雷达的原理方框图示于图 1-1。各部分的功用分别介绍如下。

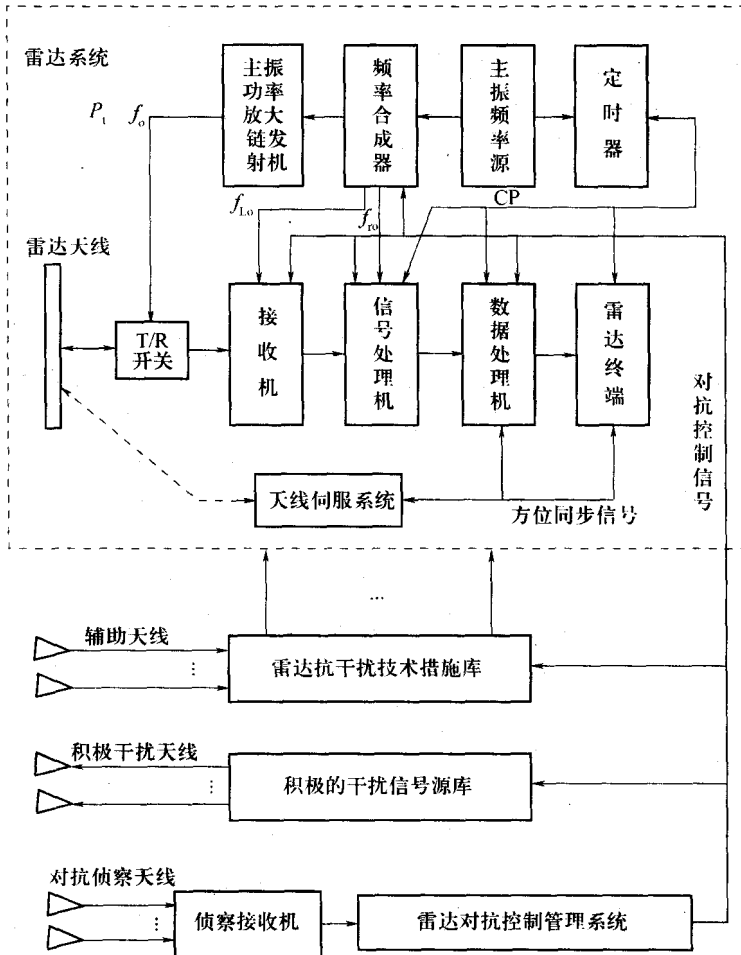


图 1-1 现代雷达系统原理方框图

## 1. 雷达系统

(1) 主振信号源。产生高频稳度、高频谱纯度的全机基准频率信号  $f_m$ 。它是雷达的“心脏”，以它为基准产生的雷达全机正常工作的各种同步触发和时钟信号将直接影响雷达的工作性能。通常，要求主振源的频率稳定度约为  $10^{-12}$ ，距主谱线 1kHz 处，相位噪声低于  $-140\text{dB}$ ，如图 1-2 所示。

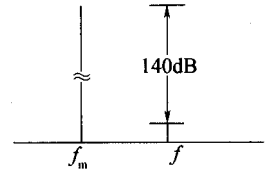


图 1-2 主振源谱线

(2) 定时器。根据主振源提供的基准信号，利用各种频率变换手段，产生各种同步脉冲和各种时钟信号。

(3) 频率合成器。根据主振源提供的基准信号，利用各种频率变换手段，产生发射激励信号  $f_o$ 、接收机本振信号  $f_{Lo}$  和相参基准信号  $f_{ro}$ ，且满足

$$f_o - f_{Lo} = f_{IF} = f_{ro} \quad (1-1)$$

(4) 主振功率放大链发射机。将来自频率合成器的发射激励信号，逐级放大到足够大的功率 ( $P_e, f_o$ )，经馈线传输给收/发开关。

(5) 收/发开关 (T/R 开关)。当发射机送来的大功率脉冲信号到达时，关闭接收机，以防止大功率泄漏信号烧坏接收机前端器件，并将大功率信号经馈线传送给雷达天线；当接收目标回波信号时，打开接收机，将目标回波信号传送给雷达接收机。

在关闭接收机时，雷达是不能探测目标的，一直到收/发开关恢复正常才能打开接收机，接收目标回波信号。因此，雷达的最小可探测距离  $R_{\min}$  为

$$R_{\min} = \frac{1}{2} C(\tau + t_o) \quad (1-2)$$

式中， $t_o$  为收/发开关恢复正常的时间； $\tau$  为雷达发射脉冲信号宽度。

(6) 雷达天线。经收/发开关，将发射机送来的大功率脉冲信号定向向自由空间辐射；雷达天线接收目标的二次辐射信号（回波信号），经收/发开关传送给雷达接收机。

(7) 接收机。将收/发开关送来的微弱的目标回波信号进行放大处理，包括高频放大、混频、主中放、检波视频、自动增益控制 (AGC)、近程增益控制 (STC)、模拟脉冲压缩 (PC)、中频抗干扰电路处理等，然后，将放大到一定幅度的目标回波信号送至数字信号处理机。

(8) 数字信号处理机。将接收机送来的目标回波视频信号进行二次处理，包括视频积累、杂波抑制、多普勒匹配滤波、恒虚警率 (CFAR) 处理、杂波图技术、解模糊、空-时二维处理、图像处理和目标识别等。

(9) 数字数据处理机。根据信号处理机送来的目标回波信号，进行目标参数录取，包括目标识别判定、目标距离/角度/速度测量、目标航迹处理、多目标跟踪、目标参数坐标变换/雷达情报传输等。

根据发射同步脉冲、目标回波延时，测量目标距离；

根据角度基准、角度增量脉冲、目标回波，测量目标方位和俯仰角；

根据动目标多普勒频移（多普勒匹配滤波） $f_d$ ，测量目标速度或根据目标距离变化率测量目标速度。

(10) 雷达终端显示器。雷达终端显示器在发射同步脉冲、正北脉冲、方位增量脉冲控制作用下，将经信号处理、数据处理后的目标回波信号进行直观显示，供雷达操作员监视。

(11) 天线伺服系统。天线伺服系统控制驱动雷达天线运动,产生方位扫描正北基准脉冲、方位扫描步进脉冲。

## 2. 雷达抗干扰技术措施库

在雷达抗干扰技术措施库中,存储着各种雷达抗干扰技术措施,根据雷达对抗管理控制系统的指令,实施最有效的雷达抗干扰措施。通常,雷达抗干扰技术措施是与雷达系统的各分机结合在一起的。它涉及雷达的许多分机,以对付多种雷达电磁干扰。比如,在频率合成器中,有随机、脉组、自适应频率捷变和波形选择等,抗窄带和宽带有源噪声干扰;在接收机中,有抗过载、宽-限-窄、脉冲压缩、近程增益控制(STC)等常用抗干扰电路,抗有源、无源噪声干扰;在信号处理机中,有动目标显示(MTI)、动目标检测(MTD)、噪声和杂波恒虚警电路(N-CFAR和C-CFAR),抗无源固定和慢动杂波干扰;在数据处理机中,有抗拖、抗倒相、抗距离和速度欺骗干扰处理电路和软件、杂波源跟踪、单站无源定位等;保护通道,可以实现空间滤波,抗空间多个点源干扰;极化识别和处理通道,可以实现变极化对抗等。

## 3. 积极的干扰信号源库

在研究雷达对抗系统时,一个很重要的方面就是要有自己的积极主动的干扰设备,用积极主动的方式参与电子战,不能局限在仅研究雷达抗干扰的问题。

在积极的干扰信号源库中,存储着各种类型的干扰机,这些干扰分有源干扰——包括窄带瞄准干扰、宽带阻塞干扰、线性调频干扰、编码干扰、距离欺骗干扰、速度欺骗干扰等;无源干扰——包括箔条干扰、红外和激光诱饵弹等。

以上干扰都是有针对性的,它是在雷达对抗管理系统的控制管理下,选用最佳的干扰信号,以破坏对方雷达或攻击武器的正常工作。

## 4. 电磁环境侦察接收机

在雷达对抗系统中,战场环境侦察接收机的任务主要有三个:一是侦察对方雷达的技术参数,供雷达对抗管理系统进行决策、产生雷达对抗指令,控制积极的干扰措施库实施最有效的干扰,以破坏对方雷达的正常工作;二是电磁环境侦察,供雷达对抗管理系统进行决策、产生雷达对抗指令,控制雷达实施最有效的雷达抗干扰;三是威胁告警侦察,供雷达对抗管理系统进行决策、产生雷达对抗指令,以控制雷达和飞行控制系统采取有效的战术技术对抗措施。雷达的技术参数侦察通过搜索、截获和分选,确定对方雷达的主要技术参数,包括工作频段、波形、重复周期、方位、时间等,供雷达对抗管理系统进行决策和控制,实施最有效的积极干扰。电磁环境侦察通过搜索、截获和分选,确定当前电磁环境的主要技术参数,包括干扰工作频段、干扰类型、方位、时间等,供雷达对抗管理系统进行决策和控制,实施最有效的雷达抗干扰。

## 5. 雷达对抗控制管理系统

雷达对抗控制管理系统是雷达实现电子对抗的核心部件。它包括战场电磁环境侦察接收机、侦察接收信息处理、雷达对抗效能评估、雷达对抗实施决策、雷达对抗实施抗控等。当雷达工作在电磁干扰环境下时,侦察接收机将收集大量的信息,经过筛选、归类和分析后,首先作出雷达实施对抗措施后的效果,然后再作出下一步的对抗决策,包括是否实施积极的有源干扰,是否变换雷达抗干扰措施,采用哪些雷达抗干扰措施,电子对抗的具体实施时间、方位、能量等。最后产生雷达电子对抗控制命令,下达到应当执行的分系统,以实现最佳的雷达对抗。

## 1.2 雷达工作频段的划分

按国际电信协会 (ITU) 关于频段的划分, 雷达工作频段的划分参见表 1-1。

表 1-1 雷达工作频段划分一览表

名称	符号	频率范围/MHz	应用
米波	HF	3 ~ 30	地面雷达 舰载雷达 机载雷达
	VHF	30 ~ 300	
		137 ~ 144 216 ~ 225	
UHF	300 ~ 1000		
	420 ~ 450 890 ~ 940		
分米波	P	230 ~ 1000	
	L	1000 ~ 2000	
		1215 ~ 1400	
S	2000 ~ 4000		
	2300 ~ 2550 2700 ~ 3700		
厘米波	C	4000 ~ 8000	
	X	8000 ~ 12500	
	Ku	12500 ~ 18000	
		13400 ~ 14400 15700 ~ 17700	
	K	18000 ~ 26500	
Ka	23000 ~ 24250 26500 ~ 40000		
毫米波	mm	33400 ~ 36000 40000 ~ 300000	

从本质上讲, 雷达的工作频率是不应该有什么限制的。不管工作频率是多少, 只要是通过辐射电磁波能量和利用目标后向散射回波对目标进行探测和定位的, 都属于雷达的频率工作范围。从表 1-1 可以看出, 现有雷达的工作频率还是很宽的, 不管工作在哪个频率, 其基本工作原理是相同的, 但是具体的实现方法却有很大的差异。通常, 地面雷达多工作在米波频段、分米波频段和厘米波频段 (HF、VHF、UHF、P、L、S、C、X); 舰载雷达多工作在分米波频段和厘米波频段 (P、L、S、C、X); 机载雷达多工作在厘米波频段、毫米波频段和激光频段 (X、Ku、K、Ka、mm、激光)。每一种频率范围都具有各自的特性, 下面分几个大的频段进行介绍。

(1) 米波频段 (包括高频、甚高频、超高频)。早期的雷达多工作在这一频段。工作在该频段的设备具有简单可靠、容易获得高辐射功率、容易制造、动目标显示性能好、不受大气回波和大气衰减的影响、造价低等优点, 因此在对空警戒引导雷达、电离层探测器、超视距雷达中有广泛的应用。它的主要缺点是目标的角分辨率低。

(2) 分米波频段 (包括 L 和 S 频段)。与米波频段雷达相比, 它具有较好的角度分辨力、外部噪声干扰小、天线和设备适中等优点, 因此在对空监视雷达中被广泛使用。当要求一部雷达兼有对空探测和目标跟踪两种功能时, S 频段最为合适。

C 频段是介于米波和分米波频段之间的一种折中频段, 可以成功地实现对目标的监视和跟踪, 广泛使用于舰载雷达。该频段辐射功率不如米波的高, 大气回波和大气衰减对其有一定

的影响。

(3) 厘米波频段。该频段主要用于武器火力控制系统,它具有体积小、跟踪精度高、可以得到足够的信号带宽等优点,因此在机载火控雷达、机载气象雷达、机载多普勒导航雷达、地面炮瞄雷达、民用测速雷达中被广泛使用。

该频段的主要缺点是辐射功率不高、探测距离较近、大气回波和大气衰减影响较大、外部噪声干扰大(尤其是气象杂波,对气象雷达来说,就是要探测气象杂波,因此气象雷达多工作在该频段)等。

(4) 毫米波频段。该频段雷达具有天线尺寸小、目标定位精度高、分辨力高、信号频带宽、抗电磁波干扰性能良好等优点。尽管如此,毫米波频段辐射功率更小、机内噪声高、外部噪声干扰大(气象杂波)、大气衰减随频率增高而迅速增加等缺点,又几乎掩盖了其优点。由于大气衰减随频率的增高并不是单调的增加,存在着一些窗口,在这些窗口上,大气衰减较小。因此,毫米波雷达仅限于工作在这些窗口上。

(5) 激光频段。激光频段的雷达,具有良好的距离和角度分辨力等优点,在测距和测绘系统中被选用。激光频段的缺点是辐射功率小、波束太窄、搜索空域周期长、不能在复杂气象条件下工作等。

### 1.3 雷达主要战术技术参数

雷达的战术参数是指雷达完成作战战术任务所具备的功能和性能。

雷达技术参数是指描述雷达技术性能的量化指标。

雷达的战术参数是设计雷达的依据。反过来,雷达的技术参数又决定了雷达的战术性能。

#### 1.3.1 雷达主要战术参数和定义

(1) 探测空域。指雷达能够以一定的检测概率和虚警概率,一定的目标起伏模型和一定的目标雷达截面积探测到目标的空间。它是由雷达最大探测距离、最小探测距离、方位扫描角、俯仰扫描角所构成的空间。

(2) 目标参数测量。目标参数包括目标距离、方位角、俯仰角(或高度)、速度、批次、机型和敌我识别等。精确地测量目标的空间坐标是雷达的主要任务。

(3) 分辨力

① 雷达分辨力,是指雷达能分辨空间两个靠近目标的能力。

② 距离分辨力,是指在同一方位上,能够区分两个在距离上比较靠近目标的最小距离 $\Delta R$ ,参见图1-3。

③ 方位/俯仰角分辨力,是指在同一距离上,能够区分两个在方位/俯仰上比较靠近目标的最小角度 $\Delta\theta_{\text{方位}}/\Delta\theta_{\text{俯仰}}$ ,参见图1-4。

$$\Delta\theta_{\text{方位}} = \theta_{\text{方位}0.5}, \quad \Delta\theta_{\text{俯仰}} = \theta_{\text{俯仰}0.5} \quad (1-3)$$

④ 速度分辨力,是指能够区分两个不同运动速度的最小速度间隔 $\Delta V$ ,即 $\Delta f_d = \frac{2}{\lambda} \Delta V$ 。

(4) 目标参数测量精度。指雷达测量目标坐标参数的误差。它是对目标进行大量测量误差的统计平均值,常用均方根值来表示,目标参数测量精度分距离测量精度 $\sigma_{\text{距离}}$ 、方位角测量精度 $\sigma_{\text{方位}}$ 、俯仰角测量精度 $\sigma_{\text{俯仰}}$ 和速度测量精度 $\sigma_{\text{速度}}$ 。

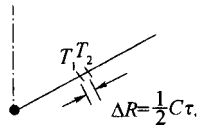


图 1-3 雷达距离分辨力示意图  
 $\tau$ —雷达发射脉冲宽度。

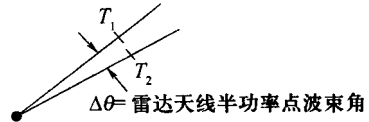


图 1-4 雷达方位分辨力示意图

(5) 目标参数录取能力。指雷达完成一次全空域探测扫描后,能够录取多少批目标参数的能力。

(6) 雷达抗干扰能力。指雷达在电子战环境中采取各种对抗措施后,雷达生存或自卫距离改善的能力。

雷达抗干扰措施包括:波形设计、空间对抗、极化对抗、频域对抗、杂波抑制和战术配合等。

(7) 雷达积极的对抗能力。指雷达自备的积极主动的干扰方式,包括有源杂波(瞄准、阻塞)干扰、欺骗干扰、箔条干扰、角度欺骗干扰等。

(8) 雷达对抗管理和控制。指雷达对战场电磁环境侦察、对抗评估、对抗决策、对抗控制的能力。

(9) 可靠性/可维护性。

(10) 体积/质量/功耗。

(11) 工作环境/机动性。

### 1.3.2 雷达主要技术参数和定义

(1) 雷达工作频率。雷达工作频率  $f_0$  和波长  $\lambda$  之间的关系为

$$f_0 = c/\lambda \quad (1-4)$$

(2) 雷达发射脉冲功率  $P_i$ 。雷达发射脉冲功率  $P_i$  和平均功率  $P_{av}$ 、发射脉冲重复周期  $T_r$ 、发射脉冲宽度  $\tau$  之间的关系为

$$P_i = (P_{av} T_r) / \tau \quad (1-5)$$

(3) 脉冲信号参数。脉冲信号参数包括发射脉冲宽度  $\tau$ 、发射脉冲重复周期  $T_r$ 、发射脉冲重复频率  $f_r$ 。发射脉冲重复周期  $T_r$  和发射脉冲重复频率  $f_r$  之间满足

$$T_r = \frac{1}{f_r} \quad (1-6)$$

雷达发射信号波形示于图 1-5。当发射脉冲信号波形选定后,雷达不模糊的最大测量距离为

$$R_{\text{不模糊}} = 1/2 \times (0.8) C T_r \quad (1-7)$$

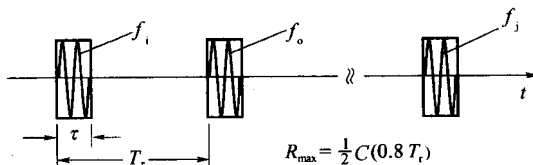


图 1-5 雷达发射信号波形图

(4) 雷达天线参数。

天线形式:线天线、面天线、平板隙缝天线、阵列天线等;

反射面/阵面尺寸;

主波束增益  $G$ ;



第一副瓣电平;  
平均副瓣电平;  
天线波束形状;  
主波束宽度  $\theta_{方位0.5}$  和  $\theta_{俯仰0.5}$ ;  
天线扫描方式;  
天线扫描周期等。

(5) 接收机灵敏度。指雷达以一定的检测概率和虚警概率所能探测到目标的最小回波信号功率,即

$$P_{\min} = kT_0 B_n F_n (S/N_0)_{\min} \quad (1-8)$$

式中,  $k$  为玻耳兹曼常数;  $T_0$  为等效噪声温度;  $B_n$  为等效噪声带宽;  $F_n$  为噪声系数;  $(S/N_0)_{\min}$  为能够探测到目标的最小信噪比。

(6) 雷达抗干扰技术。

① 天线。极低的副瓣电平、极化识别和变极化控制。

频率合成器。随机/脉组/自适应频率捷变、频率分集、自适应波形选择等。

② 接收机。抗过载、STC、宽-限-窄、脉冲压缩等。

③ 数字信号处理机。慢动杂波/固定杂波抑制(MTI)、脉冲重复频率参差/随机跳动、噪声和杂波恒虚警电路等。

④ 数字数据处理机。抗拖、反宽、抗倒相、抗距离和速度欺骗干扰处理电路和软件。

⑤ 保护通道。可以实现空间滤波,包括副瓣对消、副瓣消隐、自适应空间滤波等。

⑥ 积极主动干扰库。配备多种有源、无源、欺骗干扰机。

功率管理;

杂波源跟踪;

单/多站无源定位;

战术/技术综合对抗等。

(7) 雷达对抗管理和控制。雷达对战场电磁环境侦察、对抗评估、对抗决策、对抗控制的能力。宽频带侦察接收机,能够评估对抗效果,可以制定最佳对抗方案,能够灵活地控制雷达实施抗干扰和实施积极主动的干扰。

(8) 目标参数录取方式和能力。人工-自动-人工干预下的自动录取;雷达全空域搜索一次录取目标参数的能力。

(9) 雷达显示器。雷达显示屏尺寸;A显/B显/PPI显示器和表格显示等。

(10) 模块化/标准化/系列化设计。

(11) 故障检测/隔离能力。

(12) 功耗/工作环境。

## 参考文献

- [1] 承德保. 现代雷达反干扰技术. 北京:航空工业出版社,2000.
- [2] 中航雷达与电子设备研究院. 雷达系统. 北京:国防工业出版社,2005.
- [3] 承德保,高玉良,尹自生. AESA 机载火控雷达抗干扰能力分析. 机载有源相控阵雷达文集. 北京:中航一集团,2005.