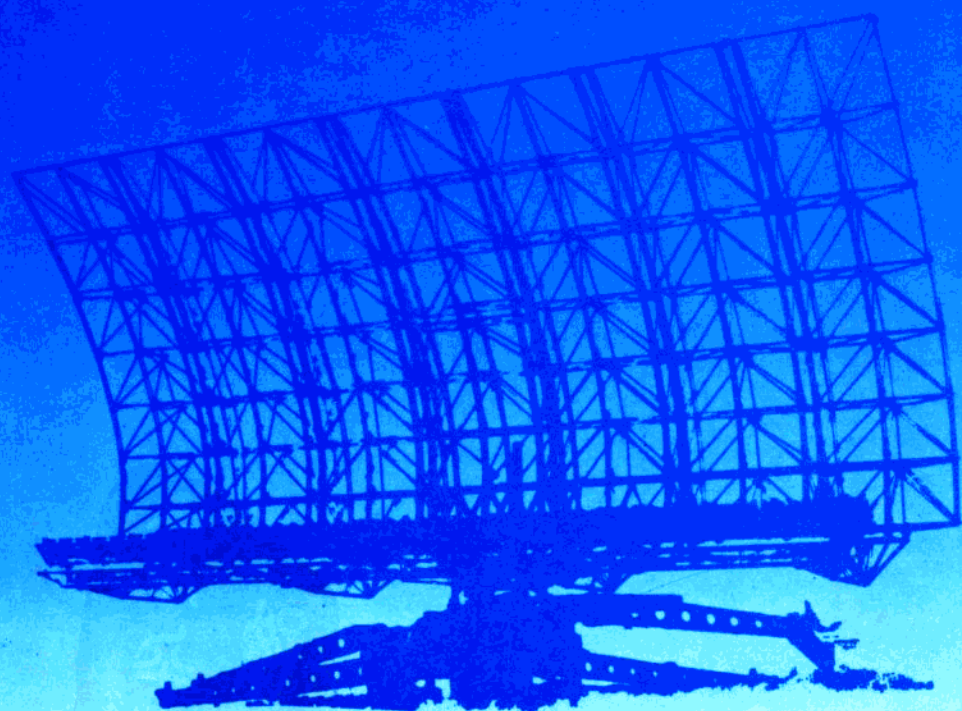


现代雷达技术

XIANDAI LEIDA JISHU

李侠 主编

朱裕生 主审



兵器工业出版社

现代雷达技术

李 侠 主 编

朱裕生 主 审

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书对现代地面防空雷达中应用的主要新技术,即无源杂波抑制技术、脉冲压缩技术、频率捷变技术、极化捷变技术、现代信号检测技术、现代天线技术进行了系统全面的论述,并对各种技术的工程应用进行了较深入的分析,涉及内容较全面,理论推导完整,是一本具有可读性和实用性的专业参考书。

该书可作为有关学科专业的高年级大学生、研究生教材,也可供从事雷达装备论证、研制、生产、检验、维修等工作的工程技术人员作为参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

现代雷达技术/李侠主编. —北京:兵器工业出版社,2000.10

ISBN 7-80132-811-6

I. 现… II. 李… III. 雷达-技术 IV. TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 70092 号

出版发行:兵器工业出版社

责任编辑:罗正云 朱丽均

社 址:100089 北京市海淀区车道沟 10 号

经 销:各地新华书店

印 刷:建筑工业出版社密云印刷厂

版 次:2000 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

印 数:1~1000 册

封面设计:花良发

责任校对:张 兰

责任印制:王京华

开 本:787×1092 1/16

印 张:24

字 数:600 千字

定 价:38.00 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

前 言

在现代陆、海、空、天、电五维一体的作战空间中,“制电权”已成为参战双方争夺的战场“制高点”。作为对空中电磁频谱资源控制的一种主要手段,地面防空雷达所要探测的目标日趋多样化,尤其是隐身飞行器和低空、超低空飞行器的问世对雷达的探测能力提出了更高的要求。另外,现代战场环境也日趋恶化,面临全频域、全时域、全空域的电子侦察,宽频带、高强度、全进程的电子干扰,以及各种反辐射武器硬摧毁等都要求地面防空雷达必须具备良好的综合对抗能力。为此,低截获概率雷达、扩谱调制雷达、自适应抗干扰雷达等现代雷达概念相继形成,一系列现代雷达技术日趋成熟并被广泛应用于各种地面防空雷达装备。为了满足武器系统与运用工程、军事装备学、信号与信息处理等学科研究生的雷达专业课教学需要,我们编写了该教材。该教材也可供从事雷达装备论证、研制、生产、检验、维修等工作的工程技术人员作为参考书使用。

该教材的编写工作由李侠、董鹏曙、黄树军、花良发共同完成,李侠担任主编并完成第一、二、三、四及第七章部分内容的编写和全书统稿工作,董鹏曙担任副主编并完成第五、六章的编写工作,黄树军参加了第七章部分内容的编写工作,花良发参加了第三章部分内容的编写、全书的校对及插图编绘工作。教材由朱裕生教授主审。

全书共分七章,主要覆盖了已在现代地面防空雷达中得到成功应用的主要技术,同时也一定程度上兼顾了各种技术的发展动态,第一章为绪论,其它各章的主要内容可概括为:

1. 雷达理论基础:信号空间概、信号的矢量表示和连续表示、信号空间的线性变换、模糊函数及雷达测量理论基础。

2. 无源杂波抑制技术:无源干扰杂波的统计特性和频谱特性、无源杂波抑制基本概念(经典白化滤波处理、现代批数据和序贯数据谱估计白化滤波处理)、自适应动目标显示、自适应动目标检测、点迹相关和凝聚处理(MTD 后处理)及脉冲多卜勒技术等。

3. 脉冲压缩技术:雷达信号的扩谱调制、线性调频脉冲压缩、相位编码脉冲压缩及非线性调频脉冲压缩等。

4. 频率和极化捷变技术:频率捷变雷达信号波形设计、非相参频率捷变和全相参频率捷变、自适应频率捷变及极化捷变等。

5. 雷达信号检测技术:雷达信号检测的基本概念、雷达信号的 A/D 变换和脉冲串加工、恒虚警检测及杂波图及数字积累检测等。

6. 现代天线技术:偏馈迭层固定多波束形成、平面一维电扫多波束形成、相控

阵天线多波束形成、数字波束形成、旁瓣消隐和旁瓣对消等。

该教材试图在两个方面形成特点：一是对每种技术的论述，均从雷达信号波形的优化设计入手，紧紧围绕着特定信号波形的匹配滤波处理系统地论述各种技术的基本概念和理论基础。二是对每种技术的介绍做到内容全面和理论推导完整，同时，也注意理论与实际的结合，并对实际工程应用中的有关问题进行了必要的探讨，为广大读者奉献一本具有可读性和实用性的专业参考书。

王被德高工对本书编写给予了有力支持，对编写内容的选取及具体编写均提出了指导性意见；郦能敬高工和徐炎祥高工、姚忠平副教授审阅了书稿并提出许多具体的修改意见。编者谨在此向上述诸位老师表示由衷的谢意。

由于编者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2000 年 10 月于武汉

《现代雷达技术》编写组

主 编 李 侠

编写组成员 董鹏曙 黄树军 花良发

主 审 朱裕生

目 录

第一章 绪论	1
1.1 雷达在现代战争中的作用	1
1.1.1 雷达是防天、防空系统中的有效预警探测手段	1
1.1.2 雷达是反导弹武器系统中的重要组成部分	2
1.1.3 雷达是高科技局部战争中摧毁敌方火力点的耳目	2
1.2 雷达在现代战争中面临的主要威胁	3
1.2.1 电子侦察	3
1.2.2 低空、超低空突防	5
1.2.3 综合性电子干扰	5
1.2.4 雷达目标隐身处理	7
1.2.5 反辐射导弹和反辐射无人机	8
1.2.6 多种反雷达手段的综合运用	9
1.3 现代雷达技术的主要特征	9
1.3.1 信号辐射的隐蔽化处理	9
1.3.2 抗干扰手段的自适应化设计	10
1.3.3 信号处理技术的普遍应用	11
第二章 雷达技术理论基础	13
2.1 信号集和信号空间	13
2.1.1 信号集和距离空间	13
2.1.2 线性空间	13
2.1.3 内积空间	15
2.1.4 信号空间的不等式和正交关系	15
2.2 信号的矢量表示	16
2.2.1 $L^2(T)$ 的 n 维子空间的选择	16
2.2.2 在 n 维子空间内的信号表示	17
2.2.3 在 n 维子空间外的信号表示	19
2.2.4 信号的归一化完备正交集逼近	20
2.3 信号的连续表示	24
2.3.1 基核和对偶基核	24
2.3.2 典型的积分变换	25
2.3.3 带通信号的表示	26
2.3.4 窄带平稳随机过程的复数表示	28
2.3.5 信号的数字特征	30
2.4 信号空间的线性变换	31
2.4.1 有限维空间中线性变换的表示	31

2.4.2	$L^2(T)$ 空间算子的表示	33
2.4.3	$L^2(T)$ 空间中的算子逼近	34
2.4.4	退化算子的实现	35
2.4.5	算子的谱表示	38
2.5	模糊函数	40
2.5.1	模糊函数	41
2.5.2	常用雷达信号的模糊函数	44
2.6	雷达测量理论基础	45
2.6.1	最大似然法估值	45
2.6.2	时延估值及测距误差	48
2.6.3	频移估值及测速误差	49
2.6.4	时延和频移的联合估计	50
2.6.5	目标参数的一维分辨力	51
2.6.6	测角误差和空间角分辨力	54
第三章	无源杂波抑制技术	56
3.1	无源干扰杂波特性	56
3.1.1	地物杂波特性	56
3.1.2	海浪杂波特性	57
3.1.3	气象杂波特性	58
3.1.4	箔条杂波特性	58
3.1.5	检波处理对杂波统计模型的影响	58
3.2	无源杂波抑制	59
3.2.1	相参回波信号	59
3.2.2	无源杂波抑制原理	61
3.3	自适应动目标显示(AMTI)	81
3.3.1	AMTI实用系统的两种构成方式	81
3.3.2	基于白化滤波技术的AMTI	82
3.3.3	防止目标白化的处理方法	88
3.4	自适应动目标检测(AMTD)	90
3.4.1	采用杂波图控制的AMTD	90
3.4.2	基于MEM的AMTD	93
3.4.3	Kalmus滤波器	97
3.4.4	点迹凝聚处理	98
3.5	脉冲多卜勒(PD)技术	103
3.5.1	经典PD雷达的基本组成	104
3.5.2	PD雷达波形设计	104
3.5.3	解模糊处理	108
3.5.4	脉冲多卜勒信号处理	113
第四章	脉冲压缩技术	122
4.1	扩谱概念和信号扩谱调制	122

4.1.1	扩谱技术	122
4.1.2	信号扩谱调制	123
4.2	线性调频脉冲压缩	124
4.2.1	线性调频脉冲压的基本概念	124
4.2.2	LFM 信号的有源产生法	128
4.2.3	LFM 信号的无源产生法	129
4.2.4	LFM 信号的压缩处理	132
4.3	数字式 LFM 脉冲压缩	134
4.3.1	数字式 LFM 信号的形成	134
4.3.2	LFM 信号的数字式压缩	137
4.4	相位编码脉冲压缩	140
4.4.1	发射信号的二相编码调制	140
4.4.2	发射信号的四相编码调制	150
4.4.3	相位编码信号的产生方法	152
4.4.4	相位编码信号的压缩处理	154
4.5	非线性调频脉冲压缩	163
4.5.1	相位逗留原理设计法	164
4.5.2	显函数族优化设计法	170
4.5.3	NI-FM 信号的工程实现	176
第五章	频率和极化捷变技术	181
5.1	频率捷变信号波形设计	181
5.1.1	瞬时带宽和变频间隔	181
5.1.2	变频速度和频率稳定度	183
5.1.3	捷变频方式	184
5.2	非相参频率捷变	187
5.2.1	非相参频率捷变信号的产生	187
5.2.2	非相参频率捷变本振信号的产生	190
5.3	全相参频率捷变	197
5.3.1	频率综合技术	197
5.3.2	主振放大式发射机	204
5.4	自适应频率捷变	207
5.4.1	JATS 技术	207
5.4.2	全相参自适应频率捷变雷达	210
5.4.3	非相参自适应频率捷变雷达	214
5.5	极化捷变	214
5.5.1	电磁波的极化	215
5.5.2	目标的极化	218
5.5.3	变极化方法	220
5.5.4	极化捷变雷达	224
第六章	信号检测技术	231

6.1 信号检测的基本概念	231
6.1.1 信号检测的主要方法	231
6.1.2 雷达信号的统计检测原理	232
6.2 雷达信号的 A/D 变换及脉冲串加工	233
6.2.1 雷达信号的幅度分层	233
6.2.2 雷达信号的时间量化	235
6.2.3 脉冲串加工	236
6.3 恒虚警检测	238
6.3.1 恒虚警检测的基本概念	238
6.3.2 慢门限 CFAR 检测	240
6.3.3 快门限 CFAR 检测	242
6.3.4 新型的 CFAR 检测	250
6.3.5 几种 CFAR 检测器性能比较	259
6.4 杂波图	267
6.4.1 杂波图的基本概念	267
6.4.2 杂波轮廓图	269
6.4.3 幅度杂波图	272
6.4.4 速度杂波图	275
6.4.5 剩余杂波图	277
6.5 数字积累检测	278
6.5.1 准最优检测的基本概念	278
6.5.2 滑窗检测	280
6.5.3 小滑窗检测	282
6.5.4 小滑窗加计数器检测	285
6.5.5 反馈积累检测	287
第七章 现代天线技术	293
7.1 现代雷达对天线的需求	293
7.1.1 目标信息获取对天线的需求	293
7.1.2 空间对抗对天线的需求	294
7.2 偏馈迭层固定多波束形成	295
7.2.1 内插测高原理	295
7.2.2 超余割平方发射波束与接收多波束形成	298
7.2.3 目标高度数据检测	300
7.3 平面阵一维电扫多波束形成	306
7.3.1 均匀线阵天线的方向图	306
7.3.2 均匀线阵天线的基本特性	307
7.3.3 平面阵一维电控多波束形成	309
7.4 相控阵天线多波束形成	315
7.4.1 相控阵天线多波束形成的意义	315
7.4.2 发射多波束形成	316

7.4.3	高频接收多波束形成	321
7.4.4	中频接收多波束形成	323
7.4.5	子阵多波束形成	325
7.4.6	Butler 多波束形成网络	329
7.5	数字波束形成	332
7.5.1	DBF 的基本原理	333
7.5.2	回波信号的数字化处理	334
7.5.3	数字波束形成器的实现方法	335
7.5.4	DBF 网络误差分析及校准	337
7.6	旁瓣消隐和旁瓣对消	340
7.6.1	引言	340
7.6.2	副瓣消隐(SLB)	341
7.6.3	副瓣对消(SLC)	350

第一章 绪 论

雷达自从 30 年代初作为探测电离层高度的科研工具开始,至今已有近 70 年的历史。雷达装备的发展,不仅受到军事斗争和民用事业需求的牵引,而且更依赖于一系列关键技术的应用。雷达发展历程表明,一项重大的技术,从概念的产生到形成实用技术,一般需要十年左右的时间。因此,每隔十年左右的时间,雷达装备的整机性能往往会出现一次质的飞跃。本书着重介绍近十多年来已成功应用或正在应用于地面防空雷达装备上的一系列现代雷达技术。

1.1 雷达在现代战争中的作用

雷达是国家防空体系的重要组成部分,是空中作战所需情报的主要信息源。在现代军事斗争中,几乎所有的大型武器系统都集成有各种雷达。尽管现代战争环境对雷达构成了越来越大的威胁,而且一系列新型探测方法也相继出现,但是,人们仍认为雷达是对飞机、导弹及战场兵力部署进行探测的最佳手段,也是对各种空中进攻武器进行引导、控制的有效方法。实践表明,各种雷达的成功运用,可使防空系统作战效率提高 30%,地空导弹命中率提高 100%。在海湾战争中,“爱国者”导弹防御系统在多功能雷达和制导雷达的作用下,成功完成了对战术导弹的防御任务,拦截成功率高达 90%。以雷达为主要信息传感器单元和武器控制手段的 C³I 系统,正是在各种雷达的大力支持下,才能快速准确搜索目标,预测各种威胁,选择最佳指挥作战方案,从而具有更强的大系统对抗的能力。

雷达在现代战争的作用主要表现在以下几个方面:

1.1.1 雷达是防天、防空系统中的有效预警探测手段

当今世界上建立了为数众多的预警探测雷达网。各国在雷达网的部署中,均注意从雷达装备的种类及性能、国家的政治、经济、军事及地理环境等诸因素进行综合考虑,提出了相应的布网原则,并且根据各种因素的变化不断调整和加强各自雷达网的建设。

最早的防空预警探测雷达网的形成,可以追溯到二战以前,由英国沿东海岸部署的 38 个雷达站和一千多个监视哨组成的对空情报勤务网。由于它们在二次大战保卫英伦三岛的防空作战中发挥了重要的作用,被世人誉为“雷达赢得了战争的胜利”。

最早的环形预警探测体制是在 1943 年德国防空体系的变动中形成的。它将德国的大多数对空情报雷达站(34 个)和 90 个观察哨站,集中于保卫最重要的政治和经济要地,在柏林周围形成两个环形网。

在现代高技术战争中,大系统对抗的趋势令人瞩目。传统的单一兵种、单一手段的局部对抗形式几乎消失,取而代之的是按照统一目的和计划,将作战系统所包含的各分系统有机组织起来所形成的大系统整体较量。大系统对抗思想在空中防御上的具体体现,就是外层空间、弹道导弹中末端、战区防空三合一的现代全空域、大纵深防御概念的形成,而雷达预警探测系统在此防御大系统中又充当了十分重要的角色。具体而言,对空预警探测雷达系统是国家防

天、防空系统的重要组成部分,它比其它军、兵种更为突出地处于国防最前沿,是最早与敌“交战”的部队。雷达预警探测系统所具有的战略侦察和预警职能,不仅可以为适时地转换全军的战备程度提供依据,而且是整个防空系统作出有效反应的前提。纵观十多年来部分国家防空作战失利的教训,无一不与其雷达预警探测系统存在缺陷有关。从一定意义上讲,雷达预警探测系统能否把住对空防御的第一道关口,不仅关系到防空作战的成败,而且还将直接关系到整个战争的胜负乃至国家安危。

1.1.2 雷达是反导弹武器系统中的重要组成部分

反导弹武器系统通常是由提供早期预警和指示的预警监视雷达、作战指挥控制中心、目标截获及跟踪制导雷达系统、数据链和导弹系统等组成。雷达在对入侵导弹的发现、跟踪及引导导弹拦截的全过程中均起着重要的作用。

在二战期间,美国研制出 SCR-584 枪炮反飞机目标截获跟踪雷达系统,基本上满足了当时的军事应用要求。随着导弹技术的发展,世界各国均注意反导弹目标截获跟踪雷达系统的研制。早期的代表是美国的 MPQ-35 和 MPQ-50“霍克”导弹系统。

现代的反导拦截系统大致可分为三大类,或者说是按三个防御层面进行研制的。第一类用于近程低空点防御,以低空飞行的作战飞机、直升机、无人机、巡航导弹、反舰导弹、反辐射导弹为作战对象。现役先进系统有以色列的“闪电”(Relampago)、英国的“长剑”(Rapier)和“海狼”(Seawolf)、法国的“西北风”(Mistral)、俄罗斯的 SA-15 等地(舰)空导弹系统,以及其它高炮、弹炮结合武器系统。

第二类反导系统用于中程中空点防御。本层次防御的任务是在上一层拦截时,就待机备战,随时准备拦截上层防御漏防的弹道导弹;不过更多的是摧毁来袭巡航导弹、轰炸机、攻击机、侦察机、无人机,以及危及自身安全的反辐射导弹、空地(舰)导弹等。现役的代表型号有俄罗斯的 S-300 和 SA-11、美国的第二次改型“爱国者”(PAC-2)、印度的“阿卡什”(Akash)。在研的有法、意等国的“中程地(舰)空导弹系统”(SAMP/T、SAMP/N)、德国的战术防空系统(TLVS)、美国的“增程拦截弹”(Erint)和“军属地空导弹系统”(MEADS)等。这些系统抗多目标饱和式攻击能力强,反干扰性能好。

第三类反导系统用于远程高空面防御。本系统的任务是当来袭战术弹道导弹尚处于助推段时,便予以探测、拦截和摧毁。美国的“战区高空区域防御系统”(THAAD)和以色列的“箭”(Arrow)都是用于这种防御的典型地空导弹系统。这两种型号,以拦截战术弹道导弹为主,亦可拦截巡航导弹、反辐射导弹、无人机及隐身飞机,2000 年前后可望部署。THAAD 的作战是自动化的,对来袭导弹能尽早拦截。因其单发杀伤概率高,故大多数来袭导弹,在遭受第一次拦截时即被摧毁。而且该系统能在首次射击后,马上进行杀伤评定。若判明第一次拦截不成功,能迅即实施第二次拦截。

1.1.3 雷达是高科技局部战争中摧毁敌方火力点的耳目

在现代高科技局部战争中,雷达在探测敌方火力点(炮位阵地、低空飞机、武装直升机)和对战区内所有参与者(武器、人员、地形地物)实施定点侦察监视等方面的作用也普遍受到各国的重视,而且成为当前军用雷达的一个重点发展领域。这类用于战场侦察的雷达按用途可细分为四种。第一种是火炮侦察雷达。这类雷达有着独特的系统工作特性、探测特性和火炮控制特性,系统设计复杂,自适应程度和目标诸元测量精度高,目标测量反应时间快,可保证根据所

获得的目标信息数据,指挥控制反击武器摧毁敌火炮阵地。美国的 AN/TPQ - 36、37 是 80 年代用于局部战争中杰出的相参距离门脉冲多卜勒电子扫描炮位侦察雷达。英、法、德联合研制的 COBRA 反炮群相控阵雷达则是现代侦察雷达,它采用了频率捷变、旁瓣压缩、非对称窄波束等先进技术,具有突出的反电磁干扰能力,能在大约 3min 内计算出监视区中 40 个敌方炮兵阵地(或 320 门火炮)同时发射时的阵地中心位置。

第二种是小型战场监视侦察雷达。主要用于对兵营、车站、桥梁以及兵员活动进行监视侦察。这种雷达的代表型号有美国 AMCX 系统公司的 386 地面监视雷达、英国 GEC 航空有限公司的 FASTAR 战场监视雷达、法国 CMT 无线电专业公司的 RB12A(军用为 RASSUR、民用为 VIGILE)地面监视雷达等。

第三种是机载战场监视雷达。美国已成功用于海湾战争的 E - 8A“联合星”预警机(JSTARS)就是一种空地相互联系的具有侦察、探测、情报分发和攻击控制的新型雷达系统。它把雷达发现目标、识别目标和指示目标结合起来,并与陆军战场情报搜集、整理和情报分发系统相连接,直接引导空中飞机发射空地导弹,制导地面陆军战术导弹(ATACMA)和多管火箭发射系统(MILBS)攻击敌坦克群、装甲车队及行军分队等。

第四种是小型战场侦察卫星雷达系统。随着海湾战争的实战检验,人们已认识到这是一个值得研究的重要领域。应当说,卫星成像雷达、机载监视雷达、机载搜索雷达和地(海)面监视雷达,对掌握海湾战争整个战区情况起到了关键作用,不仅支援了“爱国者”反导系统,同时为多国部队实施大规模空袭创造了良好条件。

1.2 雷达在现代战争中面临的主要威胁

雷达系统在战争中经过对方的硬摧毁或软摧毁能否保存下来并继续发挥作用,已经成为防空作战能否取得胜利的关键因素之一。近年来发生的几次高科技局部战争,诸如中东战争、马岛海战以及美国袭击利比亚的作战行动,特别是规模更大的海湾战争都证明了这一点。可以这样说:在现代战争中,进攻的一方必欲先置敌方雷达于死地,防御的一方要保护自己的雷达不受摧毁,攻防双方围绕着雷达进行着摧毁与反摧毁、破坏与反破坏的激烈斗争。

在现代高科技战争中,雷达将面临着各种反雷达措施的严重挑战。

1.2.1 电子侦察

如果说电子干扰是对防御雷达网实施软摧毁的有效措施,那么电子侦察就是确保电子干扰实效性的前提条件。电子侦察是利用侦察接收机来接收对方发射的雷达信号,发现对方雷达的位置和测定其有关参数,以便引导干扰机实施干扰。

侦察设备要测定的雷达参数包括雷达的工作频率、信号波形、信号的极化、信号强度以及信号调制参数(脉冲重复频率、脉冲宽度、信号频谱、天线波束宽度、扫描周期、扫描方式、天线方向图的形式等)。测出雷达这些参数后,即可引导干扰机对对方雷达进行干扰。此时,侦察设备除了保证在方向上、频率上的跟踪引导外,还要根据对方雷达的情况来确定最有效的干扰方式、干扰时机以及进行干扰的距离。

雷达侦察设备已经相当普遍,大致可分为陆用、机载、舰用、卫星用以及野战型的雷达侦察机。陆用的架设在边境和海岸线上作国防警戒;机载的主要用于专门从事侦察任务的侦察飞机和预警飞机,或者是用于载机的侦察与告警;舰用的是为舰艇侦察告警用,或作为舰艇本身干

扰设备的引导设备,也有的是专门用于侦察船上的侦察设备;卫星用雷达侦察设备是在卫星飞临被侦察区域上空时,能快速截获各种雷达所辐射的信号,进行测频、测向和自动记录;野战型雷达侦察设备主要用于野战防空、战场监视。美国已有近 200 种的侦察设备,其中空军有 70 多种,海军有 90 多种,陆军有 30 多种。英国有 20 多种,法国有 10 多种。国外的雷达告警系统(RWR)性能现状如表 1-1 所示。

表 1-1 国外雷达告警接收机的一般性能

性 能	技 术 水 平	性 能	技 术 水 平
工作频率	1 ~ 4GHz	测向精度	± 10°(均方根值)
警戒空域	方位 360°,俯仰 ± 45°	响应时间	< 1s
灵敏度	- 35 ~ - 70dBm	截获概率	接近 100%
动态范围	40 ~ 60dB	信号类型	不太复杂的脉冲,连续波
最大信号密度	20 万脉冲/s	重频范围	> 800Hz
频率分辨率	以频段表示	脉宽范围	0.1 ~ 10μs

由于电子技术的进步,雷达侦察设备已开始采用全向多波束宽带阵列天线和瞬时测频等先进技术,大大缩短了雷达侦察所需的时间。

另外,国外可见光侦察设备和红外成像设备发展迅速。据有关资料报道,机载监视照像机的分辨率达到 5 微弧度,卫星光学测量精度可达几英尺到几英寸。而第一代红外成像设备的温度分辨率为 0.1℃ ~ 1℃,下世纪初投入使用的第二代红外成像设备的温度分辨率将达到 0.15℃(无噪声抑制处理)或 0.05℃(有噪声抑制处理)。

在未来的高科技战争中,全频域、全时域、全空域的雷达侦察,将贯穿于平时和战时,以致雷达工作参数和部署位置难以隐蔽伪装。现代高技术侦察手段的广泛应用,已打破了一般意义上的军事与非军事、平时与战时的界限,全天时、全天候、连续侦察和情报适时传送,必将严重影响军用雷达的战时有效性和生存能力。

为了提高雷达的隐蔽性,必须从两方面下功夫:一是提高雷达的电磁辐射隐蔽性。这方面的根本出路是尽量降低雷达天线的副瓣电平,因为副瓣的存在,将给敌方造成连续提供高数据率信息的机会。因此,目前各国均在努力设计超低副瓣天线。现在大量采用的技术手段是平面相控阵列天线,通过先进的 CAD、CAM、CAT 等技术,实现每部天线的辐射单元间的幅度、相位及幅相误差、互耦等的有效控制,从而获得低副瓣电平的天线。

二是提高雷达信号波形的隐蔽性。这方面的根本出路是各种复杂信号的灵活运用。为此,各种复杂波形产生技术(波形库技术),即扩谱调制理论的成功应用就显得尤为重要。各种复杂波形的应用,是以全相参体制、宽带或超宽带主振放大式发射机以及宽带或超宽带天线为前提的。因此,全相参、超宽带、扩谱与低截获(LPI)技术的应用日益受到人们的重视。

为了定量描述雷达的隐蔽性,可采用 LPI 改善因子 I_{LPI} 的概念。 I_{LPI} 是侦察接收机的天线增益为 1,且侦察接收机落在雷达天线主瓣内时,通过雷达系统设计所带来的雷达反侦察距离的改善程度。 I_{LPI} 可由下式进行定量描述:

$$I_{LPI} \stackrel{\text{def}}{=} G_r \left(\frac{L_i}{L_r} \right) \left(\frac{F_n}{F_r} \right) \left[\frac{E_r(n)}{E_i(n)} \right] \left[\frac{\left(\frac{S}{N_0} \right)_n}{\left(\frac{S}{N_0} \right)_{r1}} \right] \left(\frac{B_i}{B_r} \right) \gamma_i \eta_i \tag{1.1}$$

式中,带脚标 i 的为侦察接收机的参数,带脚标 r 的为雷达参数。

由式(1.1)可知,决定 LPI 性能的主要因素是:

1. 雷达与侦察系统天线增益之比 G_r/G_i ;
2. 雷达与侦察系统损耗因子之比 L_r/L_i ;
3. 雷达接收机与侦察接收机噪声系数之比 F_{nr}/F_{ir} ;
4. 两者的积累因子之比 $E_r(n)/E_i(n)$;
5. 两者所需的最小检测信噪比之比 $\left(\frac{S}{N_0}\right)_{d1}/\left(\frac{S}{N_0}\right)_{d1}$;
6. 雷达接收机与侦察接收机带宽比 B_r/B_i ;
7. 侦察接收机极化损失系数 γ_i ;
8. 侦察接收机带宽与雷达信号带宽匹配损失系数 η_i 。

除了实现电磁信号的 LPI 性能外,在雷达站布置上还应考虑可见光隐蔽及红外辐射隐蔽。再者,提高雷达的机动性能,也是改善雷达战时隐蔽性的有效手段。为此,高机动雷达已是各国发展的重点。

以上仅是从单部雷达角度来考虑其隐蔽性的,实际上还有一些组网及特殊雷达体制应用等途径,如采用双/多基地、组网、多接收站构成无源探测等。

1.2.2 低空、超低空突防

雷达一问世,就有难以探测低空与超低空目标的问题。近年来,飞行器的发展迅速,亚音速、音速、超音速轰炸机、攻击机和巡航导弹可以利用地物屏障和低空盲区,贴近地面或水面几十米甚至十几米的高度进行低空突防。目前低空突防技术的发展,可使飞机(和巡航导弹)实现突防的最佳高度在海面为 15m,在平原区为 60m,在丘陵和山地为 120m。

电磁波具有直线传播的特性,当雷达发射的电磁波遇到山脉、丘陵、树林之类的障碍时,对雷达造成屏蔽作用,形成地物干扰和盲区。地物造成的雷达天线遮蔽角,使雷达探测和跟踪低空目标困难,难以发现地物后的目标。低空飞行带来的另一个严重问题是地面与水面的多径反射,使雷达对目标的测量精度受到很大限制。

另外,由于地球曲率的作用,而且地球的表面高低不平,故电磁波的反射对雷达探测距离的影响亦是严重的。地球曲率对目标探测距离的限制可由下式表示:

$$R_h = 4.12(\sqrt{h_r} + \sqrt{h_t}) \quad (1.2)$$

式中, R_h 为雷达视距(km); h_r 为天线高度(m); h_t 为目标高度(m)。

及早发现低空目标已经成为现代防空系统必须解决的关键问题之一。就现代雷达而言,解决地物杂波的技术比较成熟,目前一系列高性能的具有环境自适应的 MTI、MTD 技术已得到了实际的应用。解决多径效应与地球曲率的影响则还不能令人满意,目前主要的处理途径是发展低空补盲雷达,正确部署防空警戒雷达网,合适地选择低空警戒雷达阵地,以及将雷达工作平台升空(机载、气球载及星载)。应当强调的是,这些处理途径的有效性均依托于高性能的自适应 MTI、MTD、PD 技术的成功运用。

1.2.3 综合性电子干扰

综合性电子干扰(ECM)技术会欺骗、迷盲对方雷达,使其降低效能或完全失效。新型的多功能综合干扰系统,把侦察告警系统和干扰系统有机地结合在一起,以中央计算机为核心,能对信号快速截获、分选和识别,确定干扰程序,调谐干扰发射机实施瞄准干扰、阻塞干扰或欺骗

干扰;快速控制波束,对雷达实施定向干扰;根据不同雷达性能确定最佳干扰模式并鉴定干扰效果。其代表型号是美国的 AN/ALQ-161,这是世界上第一种采用相控阵技术的多功能干扰系统,可用 B-1 轰炸机装载使用。它采用了三组相控阵天线覆盖 360° 方位,实现了全自动功率管理及多波束控制,可更换功能模块达 80 件,主要用于干扰地-空、空-空导弹制导雷达及火控雷达,并可用噪声干扰警戒雷达或其它地面雷达。其频率覆盖为 0.2~18GHz,可对付 100 多部雷达的电磁环境。

现代国外电子干扰设备的干扰频率范围及干扰功率如表 1-2 所示。而对付搜索雷达的典型 ECM 技术如表 1-3 所示。

表 1-2 国外电子干扰设备主要性能

年 代	干 扰 频 率	干 扰 功 率
70 年代	S. C. X. Ku	10 ³ W
80 年代	0.5~18GHz	n × 10 ³ W
90 年代	10~140GHz	10 ⁵ W

表 1-3 对付搜索雷达的 ECM 技术

ECM 类型	对雷达的干扰效果	ECM 技术
阻塞式噪声干扰 · 远距离支援干扰(SOJ) · 自卫干扰(SST)和随行干扰	阻止目标探测和截获	低旁瓣天线,旁瓣对消,相干积累
	阻止目标探测和截获	相干积累
瞄准式噪声干扰 · 远距离支援干扰 · 自卫干扰和随行干扰	阻止目标探测和截获	与阻塞噪声(远距离干扰机)的相同,频率捷变
	同上,接收机饱和	与阻塞噪声(SSJ)相同,频率捷变,宽动态范围接收机
扫掠噪声	与阻塞噪声相同,假目标产生	保护频段受控消隐
转发器(SSJ 和随行干扰)	假目标产生,跟踪文件饱和	保持多个跟踪文件 旁瓣消隐
诱饵假目标 · 有源转发器 · 无源	假目标产生 跟踪文件饱和	保持多个跟踪文件 目标分析
箔条	阻止目标探测与截获,假目标产生	多卜勒滤波和 MTI

雷达反干扰技术涉及到雷达技术的各个方面,目前可用的技术措施达 200 多种。如果按雷达的组成划分,有发射机反干扰、接收机反干扰、天线反干扰、雷达系统反干扰等几种技术;如果从干扰和反干扰的机理划分,则可归纳为滤除、对消、屏蔽、烧穿等技术。也可从空域、时域、频域、能量以及信号形式与信息处理等方面来归纳雷达的反干扰技术。

为了对雷达的抗干扰性能进行综合评估,可以采用雷达广义分辨力单元的概念,并且可将以上所提到的各种抗干扰技术对雷达抗干扰性能的改善,用附加改善因子的方法考虑进去。当雷达天线带宽远大于发射信号带宽时,归一化处理后的雷达广义分辨力参量定义为^[10]:

$$\frac{1}{R_r} \stackrel{\text{def}}{=} T_r B_r G \tag{1.3}$$

其中 T_r 、 B_r 分别为雷达信号的持续时间及带宽, G 为天线增益。

雷达抗无源杂波性能可用 $T_r B_r G$ 描述,而雷达抗有源干扰性能可用 $P_r T_r B_r G$ 描述。雷达抗