

信息技术重点图书·雷达

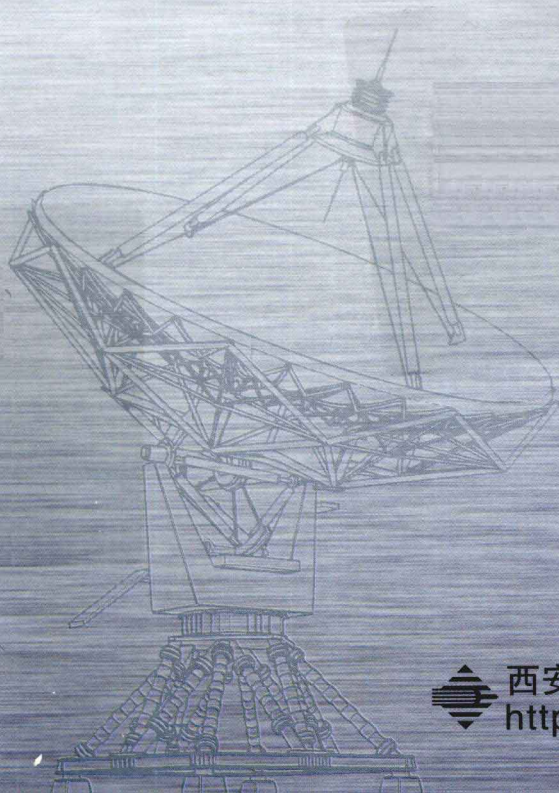


*Principle of Radar  
Countermeasure*

# 雷达对抗原理

(第二版)

赵国庆 主编◆



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

信息技术重点图书·雷达

# 雷达对抗原理

(第二版)

赵国庆 主编

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书是在1999年出版的国家级重点教材——《雷达对抗原理》的基础上修订而成的。这次修订,不仅对原书各章内容进行了调整,而且新增了一章,即第9章“对雷达的反辐射攻击”。

本书系统介绍雷达对抗的基本原理、系统的组成、应用的主要技术、系统的主要战术技术指标和主要参数的设计计算等。

全书共分10章。第1章介绍雷达对抗的基本定义和分类、雷达对抗的信号环境,以及雷达侦察干扰设备的基本功能和组成;第2、3章分别介绍对雷达信号频率/频谱、方向的测量原理和方法,对雷达辐射源无源定位的方法;第4章讨论对雷达侦察信号分选和处理的方法;第5章讨论雷达侦察的作用距离和截获概率;第6、7章分别讨论对雷达的遮盖性干扰和欺骗性干扰;第8章讨论干扰机的空间能量和时间计算以及干扰技术;第9章讨论对雷达辐射源的反辐射攻击技术;第10章介绍对雷达的无源干扰技术。

本书可作为信息对抗技术、电子信息工程等专业的本科专业课教材,也适用于该专业方向的研究生和科技工作者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

雷达对抗原理/赵国庆主编. —2版. —西安:西安电子科技大学出版社,2012.9

信息技术重点图书·雷达

ISBN 978-7-5606-2913-1

I. ①雷… II. ①赵… III. ①雷达对抗 IV. ①TN974

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 198853 号

责任编辑 夏大平 阎彬

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)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2012年10月第2版 2012年10月第7次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 14

字 数 322千字

印 数 20001~24000册

定 价 24.00元

ISBN 978-7-5606-2913-1/TN·0671

**XDUP 3205002-7**

\*\*\*如有印装问题可调换\*\*\*

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

# 前 言

本教材是在原电子工业部全国电子信息类专业教材编审出版规划制定的“九五”国家级重点教材，由电子工程专业教学指导委员会编审、推荐出版的《雷达对抗原理》(1999年由西安电子科技大学出版社出版)的基础上加以修订而成的。

本教材由西安电子科技大学赵国庆教授修编。

本教材的内容原为9章，参考学时为45~60。此次修编增加了“对雷达的反辐射攻击”一章(第9章)，以反映雷达对抗技术向直接攻击和杀伤发展的动向。

在本教材修编过程中，得到了中电科技集团第29研究所张锡祥院士、航天科工集团陆伟宁研究员等的大力支持，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疏漏，殷切希望广大读者批评指正。

编 者  
2012年6月

# 第一版前言

本教材系按原电子工业部的《1996~2000年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由电子工程专业教学指导委员会编审、推荐出版。本教材由西安电子科技大学赵国庆教授担任主编，主审和责任编委为电子科技大学陈天麒教授。

本教材的参考学时为46~60，其主要内容共分为9章。第1章雷达对抗概述，介绍雷达对抗的基本概念和基本知识；第2、3、4、5章为雷达侦察部分，分别介绍对雷达信号频率的测量，对雷达信号方向的测量和定位，雷达侦察的信号处理，雷达侦察的作用距离和截获概率等；第6、7、8、9章为雷达干扰部分，分别介绍对雷达的遮盖性干扰、欺骗性干扰，干扰机的构成和干扰的能量计算与时间计算，以及对雷达的无源对抗技术。

本教材是在原西北电讯工程学院林象平等主编的《雷达对抗原理》(1985年由西北电讯工程学院出版社出版)教材的基础上编写而成的。这次重新编写，根据近年来雷达对抗原理和技术的发展和电子工程专业教学改革的要求，对原版书进行了修改和增补，以力求反映雷达对抗的新思想、新理论、新概念和新技术，同时删除了一些有关设备的构成以及具体技术实现等细节内容。

使用本教材时应注意以“雷达原理”、“信号与系统”、“统计信号处理”或“随机信号分析”等为先修课程。

本教材由赵国庆编写第3、4、5、7章，张正明编写第2、6章，林象平教授与赵国庆、张正明共同编写了第1、8、9章。参加审阅工作的还有电子科技大学的杨肇基老师、西安电子科技大学的杨绍全、魏本涛、梁百川等老师，他们都为本书提出了许多宝贵意见，在此表示诚挚的感谢。

由于编写者水平有限，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  
1999年3月

## 部分主要参数符号表

$S$	雷达对抗的信号环境
$s_i(t)$	信号环境中第 $i$ 个辐射或散射源信号
$s_{i,j}(t)$	第 $i$ 个辐射源发射的第 $j$ 个脉冲信号
$A_{i,j}(t)$	第 $i$ 个辐射源发射的第 $j$ 个脉冲信号的包络函数
$t_{i,j}$	第 $i$ 个辐射源发射的第 $j$ 个脉冲信号的时间迟延
$\tau_{i,j}$	第 $i$ 个辐射源发射的第 $j$ 个脉冲信号的脉宽
$\varphi_{i,j}(t)$	第 $i$ 个辐射源发射的第 $j$ 个脉冲信号的相位调制函数
$P_i(R_{i,r})$	在距离 $R_{i,r}$ 处收到第 $i$ 个辐射源发射的脉冲信号功率
$G_i(\alpha_{i,r}, \beta_{i,r})$	第 $i$ 个辐射源在接收方向 $\alpha_{i,r}, \beta_{i,r}$ 的发射天线增益
$G_r(\alpha_i, \beta_i)$	接收天线在第 $i$ 个辐射源方向 $\alpha_i, \beta_i$ 的增益
$a_i(t)$	第 $i$ 个辐射源发射的脉冲包络形状函数
PRI	脉冲重复间隔或脉冲重复周期
$\text{PRI}_{i,j}$	第 $i$ 个辐射源发射第 $j$ 个脉冲信号的时间间隔
$\delta T$	重复周期抖动量
$\{n_p\}_{p=1}^n$	各脉冲重复周期/脉宽/载频的工作脉冲数
$D_R$	雷达侦察设备的信号检测空间
$\Omega_{\text{RF}}$	雷达侦察设备的信号载频检测范围或工作频段, 频率测量范围
$\Omega_{\text{AOA}}$	雷达侦察设备的信号到达方向检测范围或角度工作范围
$\Omega_{\text{PW}}$	雷达侦察设备的信号脉宽检测范围
$\Omega_{\text{P}}$	雷达侦察设备的信号功率检测范围
$\Delta\Omega_{\text{AOA}}$	瞬时视野; 雷达侦察设备在任一瞬间能够检测的方向范围
$\lambda$	波长; 信号流密度
$\lambda_{\text{max}}$	最大波长; 最大平均脉冲数
$f_{ri}$	辐射源(雷达) $i$ 的脉冲重复频率
$P_{ri}$	辐射源(雷达) $i$ 发射的脉冲属于 $D_R$ 的概率; 侦察系统对雷达 $i$ 发射信号的检测概率
PDW	脉冲描述字
$\theta_{\text{AOA}}$	信号到达角
$f_{\text{RF}}$	信号载频
$t_{\text{TOA}}$	信号到达时间
$\tau_{\text{PW}}$	信号脉宽
$A_{\text{P}}$	信号幅度或功率
$F$	信号脉内调制标志
$G_1(t, f)$	$t$ 时刻单个脉冲信号的频谱
$G_m(t, f)$	$t$ 时刻开始 $m$ 个脉冲信号的频谱
$\Delta\Omega_{\text{RF}}$	瞬时带宽

$\Delta f$	频率分辨力
$\delta f$	频率测量精度
$\Omega_{SF}$	无模糊频谱分析范围
$\Delta f_{SF}$	频谱分辨力
$\delta f_{SF}$	频谱分析误差
$s_{f\min}$	频率测量和频谱分析系统的灵敏度；测频与频谱分析灵敏度
$D_f$	频率测量和频谱分析系统的动态范围；测频与频谱分析的动态范围
$\tau_{f\min}$	最小测频和频谱分析脉宽
$t_{RF}$	测频时间
$t_{SF}$	频谱分析时间
$\Delta t_{SF}$	时频分辨力
$\omega_e$	等效带宽
$P_{IF}$	频域截获概率
$T_{IF}$	频域截获时间
$f_L(t)$	调谐本振频率
$E(t)$	输出视频信号包络
$d_{ms}$	镜像抑制比
$T_f$	频率搜索周期
$\tau_f$	频率搜索窗驻留时间
$T_S$	雷达天线在侦察机方向的照射时间；雷达信号的连续照射时间
$T_C$	侦察接收机对 PDW 的检测处理时间
$\alpha$	方位角；可靠系数
$T_A$	雷达天线的扫描周期
$\theta_{0.5}$	雷达天线的半功率波束宽度
$\Omega_\theta$	雷达天线的扫描范围
DLVA	检波/对数视放
LNA	低噪声放大
LNLA	低噪声限幅放大
STFT	短时傅立叶变换
$T_c$	压缩滤波器的时宽
$\Delta f_c$	压缩滤波器的带宽
$\delta\theta$	测向精度
$\Delta\theta$	测向分辨力
$t_A$	测向时间
$P_{1A}$	方向截获概率
$T_{1A}$	方向截获时间
$s_{Amin}$	测向灵敏度
$\Omega_{AOA}$	测向范围
$D_A$	测向动态范围

$\Omega_{DP}$	定位范围
$\Delta\Omega_{DP}$	瞬时定位范围
$\sigma_P$	定位精度
$t_{DP}$	定位时间
$T_R$	侦察天线的扫描周期
$\theta_a$	雷达天线的波束宽度
$\theta_r$	侦察天线的波束宽度
$\Omega_a$	雷达天线的扫描范围
$T_{sp}$	对指定辐射源的信号处理时间
$T_{av}$	对信号环境中辐射源的平均处理时间
$\{C_j\}_{j=1}^m$	含有 $m$ 部已知雷达的数据库
$\{D_k\}_{k=1}^n$	对未知雷达数据的 $n$ 种分划
$PDW_{i,j}$	第 $j$ 部或第 $j$ 类雷达的第 $i$ 个脉冲描述字
$F_a$	雷达天线的扫描方式
$t_{PRI_i}$	第 $i$ 个脉冲与其下一个脉冲的间隔时间
$P_{TSS}$	接收机的切线灵敏度
$P_{OPS}$	接收机的工作灵敏度
$P_{DS}$	接收机的检测灵敏度
$\Delta f_R$	侦察接收机检波前的射频带宽
$\Delta f_V$	侦察接收机检波后的视频带宽
$G_R$	侦察接收机检波前的增益
$F_R$	侦察接收机检波前的噪声系数
$G_V$	侦察接收机检波后的增益
$F_V$	侦察接收机检波后的噪声系数
$P_t$	雷达发射脉冲功率
$G_t$	雷达发射天线增益
$A_r$	接收天线有效面积
$\gamma_r$	侦察接收天线的极化失配损耗
$G_r$	侦察接收天线的增益
$P_{r\ min}$	侦察接收机灵敏度
$R_r$	侦察探测距离
$R_a$	雷达探测距离
$R_{sr}$	侦察直视距离
$P_{a\ min}$	雷达接收机灵敏度
$R_{sa}$	雷达直视距离
$G_{s\ max}$	最大旁瓣电平
$G_{sav}$	平均旁瓣电平
$P_{fa}$	雷达检测的虚警概率
$P_d$	雷达的检测概率或发现概率



$S/N$	信噪比
$f_{j0}$	干扰的中心频率
$\Delta f_j$	干扰带宽
$K_a$	雷达接收机输出端的干扰压制系数
VCO	压控振荡器
DRFM	数字射频存储器
DJS	数字干扰合成器
$P_f$	雷达受欺骗的概率
$\delta V_{av}$	雷达对目标参数测量误差的均值
$\sigma_v^2$	雷达对目标参数测量误差的方差
ERP	有效辐射功率
$P_j$	干扰发射功率
$G_j$	干扰发射天线增益
$P_{JS}$	干扰发射机饱和输出功率
$K_p$	转发增益
$\Omega_{JF}$	干扰的工作频率范围
$\delta f_j$	干扰的频率引导精度
$t_{JF}$	干扰频率引导时间
$\Omega_{J\theta}$	干扰的工作空间范围
$\Delta \theta_j$	干扰波束宽度
$\delta \theta_j$	干扰波束的指向引导精度
$t_{J\theta}$	干扰波束的指向引导时间
$F_{JP}$	干扰的极化方式
$\delta P_j$	干扰的极化引导精度
$t_{JP}$	干扰的极化引导时间
$\Omega_{Ej}$	有效干扰空间
$\Delta f_r$	雷达接收机带宽
$K_j$	雷达接收机输入端的干扰压制系数
$R_{K \max}$	反辐射武器的最大作用距离
$V_K$	反辐射武器的飞行速度
$\delta R_K$	反辐射武器的引导精度
$r_K$	反辐射武器战斗部或威胁武器的杀伤半径

# 目 录

<b>第 1 章 雷达对抗概述</b> .....	1	2.5.1 线性调频变换原理 .....	37
1.1 雷达对抗的基本概念与含义 .....	1	2.5.2 压缩接收机测频系统的 基本组成 .....	38
1.1.1 雷达对抗的含义及重要性 .....	1	2.5.3 压缩接收机的测频误差 .....	39
1.1.2 雷达对抗的基本原理与 主要技术特点 .....	3	2.6 声光变换测频技术 .....	40
1.1.3 雷达对抗与电子战 .....	4	2.6.1 基本工作原理 .....	40
1.2 雷达对抗的信号环境 .....	5	2.6.2 声光变换测频系统的组成 .....	43
1.2.1 雷达对抗系统中信号环境的描述 ..	5	2.6.3 测频误差、输出波形和 主要特点 .....	43
1.2.2 现代雷达对抗信号环境的特点 .....	8	2.7 对雷达信号的时频分析技术 .....	44
1.3 雷达侦察概述 .....	9	2.7.1 单个射频脉冲信号脉内 时频调制信息的分析 .....	45
1.3.1 雷达侦察的任务与分类 .....	9	2.7.2 脉组信号时频调制信息的分析 .....	49
1.3.2 雷达侦察的技术特点 .....	11	习题二 .....	49
1.3.3 雷达侦察设备的基本组成 .....	11	<b>第 3 章 对雷达信号方向的 测量和定位</b> .....	51
1.4 雷达干扰概述 .....	12	3.1 概述 .....	51
1.4.1 雷达干扰技术的分类 .....	12	3.1.1 测向定位的作用与分类 .....	51
1.4.2 雷达干扰系统的基本组成 .....	14	3.1.2 测向定位的主要技术指标 .....	53
习题一 .....	15	3.2 振幅法测向 .....	54
<b>第 2 章 对雷达信号的频率测量与 频谱分析</b> .....	17	3.2.1 波束搜索法测向 .....	54
2.1 概述 .....	17	3.2.2 全向振幅单脉冲测向技术 .....	57
2.1.1 频率测量和频谱分析的作用与 主要技术指标 .....	17	3.2.3 多波束测向 .....	59
2.1.2 频率测量和频谱分析技术的 分类 .....	19	3.3 相位法测向 .....	63
2.2 频率搜索测频技术 .....	21	3.3.1 线阵干涉仪测向 .....	63
2.2.1 搜索式超外差测频技术 .....	21	3.3.2 圆阵干涉仪测向 .....	69
2.2.2 频率搜索方式和速度的选择 .....	23	3.4 短基线时差测向 .....	72
2.2.3 射频调谐测频技术 .....	24	3.4.1 两元天线的一维时差测向 .....	72
2.3 比相法测频技术 .....	24	3.4.2 三元天线的二维时差测向 .....	74
2.3.1 基本工作原理 .....	25	3.5 对雷达辐射源的定位 .....	75
2.3.2 多路相关器的并用 .....	26	3.5.1 单站定位 .....	75
2.3.3 同时信号的影响 .....	28	3.5.2 多站定位 .....	79
2.4 信道化测频技术 .....	29	习题三 .....	84
2.4.1 模拟信道化测频技术 .....	29	<b>第 4 章 雷达侦察的信号处理</b> .....	87
2.4.2 数字信道化测频技术 .....	33	4.1 概述 .....	88
2.5 线性调频变换测频技术 .....	37		

4.1.1	信号处理的主要技术指标	88	6.1.3	最佳遮盖干扰波形	124
4.1.2	信号处理的基本流程和 工作原理	90	6.2	射频噪声干扰	125
4.2	对雷达信号极化和时域参数的测量	91	6.2.1	射频噪声干扰的统计特性	125
4.2.1	对雷达信号极化的测量	91	6.2.2	射频噪声干扰对雷达接收机和 信号检测的影响	125
4.2.2	$t_{\text{TOA}}$ 测量	92	6.2.3	射频噪声干扰的产生技术	129
4.2.3	$\tau_{\text{PW}}$ 测量	93	6.3	噪声调幅干扰	131
4.2.4	$A_{\text{P}}$ 测量	94	6.3.1	噪声调幅干扰的统计特性	132
4.3	雷达侦察信号的预处理	95	6.3.2	噪声调幅干扰对雷达信号检测的 影响	133
4.3.1	无用数据的删除	95	6.3.3	噪声调幅干扰的产生技术	135
4.3.2	对已知雷达辐射源数据的 预处理	96	6.4	噪声调频干扰	135
4.3.3	对未知雷达辐射源数据的 预处理	96	6.4.1	噪声调频干扰的统计特性	135
4.3.4	预处理机的组成	97	6.4.2	噪声调频干扰对雷达信号检测的 影响	138
4.4	雷达侦察信号的主处理	100	6.4.3	噪声调频干扰的产生技术	141
4.4.1	主处理的作用与技术分类	100	6.5	噪声调相干扰	142
4.4.2	已知雷达信号的主处理	100	6.5.1	噪声调相干扰的统计特性	142
4.4.3	未知雷达信号的主处理	105	6.5.2	噪声调相干扰对雷达信号检测的 影响	143
习题四		107	6.5.3	噪声调相干扰的产生技术	143
<b>第5章</b>	<b>雷达侦察作用距离与截获概率</b>	109	习题六		143
5.1	侦察系统的灵敏度	109	<b>第7章</b>	<b>欺骗性干扰</b>	145
5.1.1	切线灵敏度 $P_{\text{TSS}}$ 的定义	109	7.1	概述	145
5.1.2	$P_{\text{TSS}}$ 的分析计算	109	7.1.1	欺骗性干扰的作用与分类	145
5.1.3	$P_{\text{OFS}}$ 的分析计算	113	7.1.2	欺骗性干扰的效果度量	148
5.1.4	$P_{\text{DS}}$ 的分析计算	113	7.2	对雷达距离信息的欺骗	148
5.2	侦察作用距离	114	7.2.1	雷达对目标距离信息的检测和 跟踪	148
5.2.1	侦察方程	114	7.2.2	对脉冲雷达距离信息的欺骗	151
5.2.2	侦察的直视距离	116	7.2.3	对连续波调频雷达距离信息的 欺骗	154
5.2.3	侦察作用距离对雷达作用距离的 优势	116	7.3	对雷达角度信息的欺骗	157
5.2.4	对雷达旁瓣信号的侦察	117	7.3.1	雷达对目标角度信息的 检测和跟踪	157
5.3	侦察截获概率与截获时间	117	7.3.2	对圆锥扫描雷达角度信息的 欺骗干扰	162
5.3.1	前端的截获概率与截获时间	118	7.3.3	对线性扫描雷达角度信息的 欺骗干扰	164
5.3.2	系统截获概率与截获时间	119	7.3.4	对单脉冲雷达角度信息的 欺骗干扰	166
习题五		120	7.4	对雷达速度信息的欺骗	170
<b>第6章</b>	<b>遮盖性干扰</b>	122			
6.1	概述	122			
6.1.1	遮盖性干扰的作用与分类	122			
6.1.2	遮盖性干扰的效果度量	123			

7.4.1 雷达对目标速度信息的检测和跟踪 .....	170	8.5.2 DRFM 的读写方式 .....	194
7.4.2 对测速跟踪系统的欺骗干扰 .....	174	8.5.3 DRFM 的干扰调制 .....	195
7.5 对雷达 AGC 电路的欺骗干扰 .....	177	习题八 .....	196
7.5.1 跟踪雷达的 AGC 电路 .....	177	<b>第 9 章 对雷达的反辐射攻击</b> .....	198
7.5.2 对 AGC 控制系统的欺骗干扰 .....	178	9.1 概述 .....	198
习题七 .....	178	9.1.1 反辐射攻击的作用与主要技术要求 .....	198
<b>第 8 章 干扰机构成及干扰能量计算</b> .....	180	9.1.2 反辐射攻击的系统组成与分类 .....	199
8.1 单部有源干扰系统的基本组成和主要性能指标 .....	180	9.2 反辐射导引技术 .....	200
8.1.1 单部有源干扰机的基本组成 .....	180	9.2.1 反辐射导引设备的基本组成 .....	200
8.1.2 分布组网式有源雷达干扰系统的基本组成 .....	183	9.2.2 反辐射导引的信号处理 .....	201
8.1.3 有源雷达干扰系统的主要性能指标 .....	183	习题九 .....	202
8.2 干扰系统的有效干扰空间 .....	184	<b>第 10 章 对雷达的无源干扰技术</b> .....	204
8.2.1 单部干扰资源对单部雷达的基本干扰方程 .....	185	10.1 箔条干扰 .....	204
8.2.2 多部干扰资源对多部雷达的有效干扰空间 .....	187	10.1.1 箔条干扰的基本原理 .....	204
8.3 干扰机的收发隔离与效果监视 .....	187	10.1.2 箔条的战术应用 .....	206
8.3.1 干扰机的收发隔离 .....	188	10.2 反射器 .....	207
8.3.2 干扰效果的监视 .....	189	10.2.1 角形反射器 .....	207
8.4 载频移频技术 .....	189	10.2.2 龙伯透镜反射器 .....	208
8.4.1 调相移频技术 .....	190	10.3 假目标与雷达诱饵 .....	208
8.4.2 IQ 调制移频技术 .....	191	10.3.1 假目标 .....	208
8.5 数字射频存储(DRFM)干扰技术 .....	192	10.3.2 雷达诱饵 .....	209
8.5.1 DRFM 的基本组成与工作原理 .....	193	10.4 目标隐身技术 .....	210
		习题十 .....	211
		<b>参考文献</b> .....	212

# 第1章 雷达对抗概述

电磁波具有空间传播速度快,衰减较低,受天气和气象等外界因素影响小,且便于产生、利用和控制等特点,已经成为现代社会生活和军事斗争中信息获取、信息传输、信息利用和信息控制的重要媒质。现代军事技术的一个重要特点,就是各种武器装备越来越广泛地采用和依赖于无线电电子技术。各种武器装备威力的发挥,战区的监视和警戒,诸兵种协同作战时的调配、联系、指挥和控制等,都越来越多地依赖于以电磁波为代表的信息系统的效能,特别是雷达系统的效能。

雷达是信息化战场和武器系统中目标信息获取、指挥控制、精确制导和火力打击作战体系中最重要装备。破坏了雷达系统的正常工作,不仅会破坏作战体系重要的信息来源,也会严重影响作战体系整体的作战效能。

雷达对抗是对敌方雷达进行侦察、干扰、摧毁,以及防护敌方对我方雷达进行侦察、干扰和摧毁的电子对抗技术。雷达对抗主要包括雷达侦察,雷达干扰和摧毁,雷达防护等内容。雷达对抗的目的就是通过对敌方雷达的侦察、干扰和摧毁,获取敌方武器装备、兵力部署、作战指挥等方面的重要情报;在重要的战斗和战役进程中,使敌方的武器系统失效、指挥控制失灵、装备损失和人员伤亡,为消灭敌人、保存自己、取得战争胜利创造条件。

本书重点阐述雷达侦察、雷达干扰和摧毁的基本原理。

## 1.1 雷达对抗的基本概念与含义

### 1.1.1 雷达对抗的含义及重要性

雷达通过发射和接收电磁波获取目标信息。在现代战争中,以雷达为代表的有源探测装备是获取目标战场信息的重要手段,也是有效指挥和控制各种火力打击武器的基本保证。如图1-1所示的一架作战飞机,可能会受到敌方多种雷达和杀伤武器的威胁。如果它及其所在方能够及时、准确地检测识别敌方雷达和威胁态势,并且利用各种雷达对抗资源,采取相应、有效的反制措施,就可先敌发起攻击,摧毁敌方雷达和武器系统,完成预定的作战任务,同时保障己方人员和装备的安全。

雷达对抗是一切从敌方雷达及其武器系统获取信息(雷达侦察),破坏、扰乱和摧毁敌方雷达及其武器系统的正常工作(雷达干扰和摧毁)的战术、技术措施的统称。雷达对抗在现代战争中的地位和作用主要表现为以下两点。

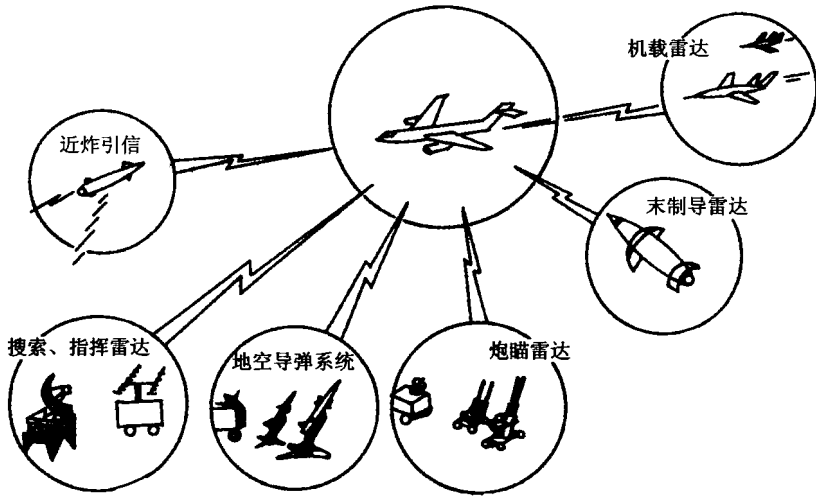


图 1-1 作战飞机面临的威胁雷达环境示意图

### 1. 雷达对抗是取得信息优势和军事优势的重要手段和保证

现代雷达是在全天候、大视场、复杂战场环境下，快速、准确、可靠地进行目标探测、跟踪、制导和火控的重要装备。破坏或毁伤了雷达的正常工作，也就破坏了作战系统中最重要的信息来源。特别是在信息化战场上，一旦丧失了信息获取途径，各级指挥控制中心、作战武器平台和作战人员就会成为“聋子”、“瞎子”，必将严重丧失作战能力。

第二次世界大战中的诺曼底登陆战役，英美联军通过雷达侦察，事前完全掌握了德军在战区内 40 多部雷达的部署、工作频率等信息，一方面进行大规模的火力轰炸，另一方面炮制假的进攻方向。战役开始后，又进行了连续不断的轰炸和干扰，使德军雷达完全陷于瘫痪，根本不能提供任何有用信息，联军参战的 2127 艘舰船只损失了 6 艘，损失率不到 0.3%。

在近年来的海湾战争、科索沃战争中，以美国为首的多国部队和北约部队凭借高科技优势，从战前至整个战争过程中，都对广大战区实施了不间断的电子侦察、强大的电子干扰和精确的火力打击，使对方的雷达不能工作，无线通信中断，只能依靠电磁“静默”来维持装备和人员的安全。

### 2. 雷达对抗是消灭敌人、完成任务、保存自己的必要武器

雷达侦察可以全天候、安全、隐蔽地工作，在比雷达探测更大的视场范围和复杂的电磁环境中，有效获取包括雷达在内的各种辐射源信息，例如：辐射源的位置信息，工作状态信息和信号调制信息等。这些信息既可以为指挥决策提供重要的情报，也可以用来引导干扰和杀伤武器，破坏或扰乱敌方雷达及其武器系统的正常工作，甚至直接毁伤敌方装备，杀伤作战人员。在各种精确打击武器日益发展的今天，雷达及其武器系统一旦被侦察定位，将会处于十分危险的境地。目前反辐射武器的攻击误差仅几米，攻击距离可达数百公里，安装于弹道导弹、巡航导弹和长航时无人机上的反辐射武器，作战距离甚至可达数千公里。如果没有受到干扰，雷达制导的防空导弹一次齐射的目标杀伤概率在 90% 以上，防空火炮一次点射的目标杀伤概率在 80% 以上。而在越南战争中，美军综合采用了多种雷达对抗措施，曾一度使地空导弹的杀伤概率降到 2%，防空火炮的杀伤概率降到 0.5% 以

下。在海湾战争中，美军的 F-117A 隐形战斗机出动数千架次，执行防空火力最强地区的作战任务，在强大的电子干扰掩护下，竟然无一损失。

### 1.1.2 雷达对抗的基本原理与主要技术特点

#### 1. 雷达对抗的基本原理

雷达对抗首先依赖于雷达的电磁辐射。为了获取目标信息，雷达需要将高功率的电磁波能量照射到目标上，由于目标的电磁散射特性，将对入射电磁波产生相应的散射和调制，雷达接收到来自目标的散射信号，再根据收发信号的相对调制关系，解调目标信息。

雷达对抗的基本原理如图 1-2 所示。在一般情况下，雷达侦察设备直接接收雷达发射的电磁波信号，检测该雷达的存在，测量其所在方向、信号频率和其它调制参数等，也可以根据已经掌握的雷达信号先验信息，判断该雷达的功能、工作状态和威胁程度等，并将各种处理结果提交各级指挥控制中心、干扰机、反辐射武器导引设备等。由此可见，实现雷达侦察的基本条件有：

- (1) 雷达发射电磁波；
- (2) 侦察机接收到足够强的雷达信号；
- (3) 雷达信号的调制方式和参数位于侦察机处理能力之内；
- (4) 侦察机能够适应其当前所在的电磁信号环境。

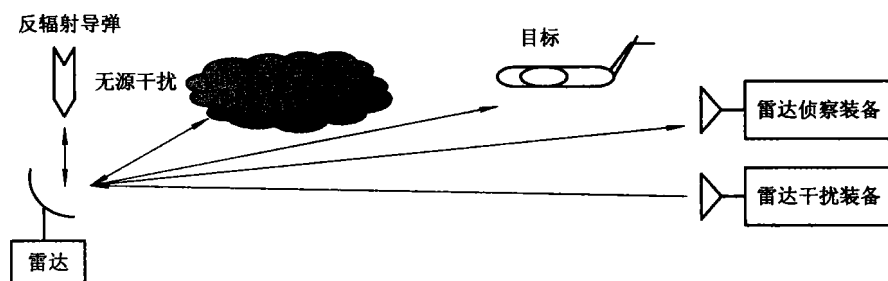


图 1-2 雷达对抗的基本原理示意图

#### 1) 雷达干扰的基本原理

雷达干扰的基本原理是：

- (1) 破坏雷达探测目标的电磁波传播空间特性；
- (2) 产生干扰信号进入雷达接收机，破坏其检测目标和测量目标信息；
- (3) 减小目标的雷达截面积。

#### 2) 雷达反辐射攻击的基本原理

雷达反辐射攻击的基本原理是：

- (1) 检测识别敌方的威胁雷达辐射源信号；
- (2) 锁定和跟踪该辐射源信号，实时向攻击武器飞行控制机构提供角度测量信息；
- (3) 引导反辐射武器不断逼近该辐射源，直到战斗部将其摧毁。

#### 2. 雷达对抗的主要技术特点

雷达对抗的主要技术特点是：

### 1) 宽频带、大视场、复杂电磁信号环境

随着人类对电磁谱的不断开发和利用,特别是近 20 年来对电磁谱的极度开发和利用,各种辐射源、散射源形成的电磁波极度拥塞了时间、空间和频谱范围,每个辐射源电磁波信号的调制变化,大量辐射信号在时间、频谱、空间的密集、随机混叠,构成了极度复杂的电磁信号环境。而雷达对抗设备要在如此复杂、博大的电磁信号环境中对敌方雷达实施全面、正确、有效的侦察、干扰和攻击,就必须适应宽频带、大视场、复杂电磁信号环境的要求。这也是雷达对抗装备必须具有的显著技术特点。

### 2) 瞬时信号检测、测量和快速、非匹配信号处理

由于雷达信号大多为射频脉冲信号,持续时间很短,甚至仅为数十纳秒。在一般情况下,雷达侦察设备预先并不知道这些射频脉冲的入射方向、射频频谱、到达时间和各种调制特性,也无法像雷达那样设计匹配接收机和信号处理机。因此,雷达侦察接收机和信号处理机首先需要具有对射频脉冲信号的瞬时检测和对信号主要特征参数的瞬时测量能力;其次需要具有对瞬时检测脉冲信号的快速分选和对辐射源检测、识别处理的能力;然后需要具有对某些重要信号的精确分析、跟踪和处理能力。

上述特点具有极大的挑战性,带来了很高的技术难度,同时也促进了雷达对抗理论和技术长期不懈、永无止境的发展。

## 1.1.3 雷达对抗与电子战

电子战(EW)是敌我双方利用电磁能和定向能以破坏敌方武器装备对电磁谱、电磁信息的利用,或对敌方装备和人员进行攻击和杀伤,同时保障己方武器装备效能的正常发挥和人员的安全而采取的军事行动。

电子战包括两个相互斗争的方面:电子对抗(ECM,包括电子侦察、电子干扰、电子隐身和电子摧毁等)和电子反对抗(ECCM,包括电子反侦察、电子反干扰、电子反隐身和电子反摧毁等)。电子干扰、电子摧毁也称为电子进攻,电子反侦察、电子反干扰和电子反摧毁也称为电子防护。电子战的技术分类很多,以无线电设备或器材的功能类别进行分类是常用的方式之一,如:雷达对抗与反对抗,通信对抗与反对抗,光电对抗与反对抗,无线电引信对抗与反对抗,导航对抗与反对抗,敌我识别系统的对抗与反对抗等。

电子对抗从频域上可分为射频对抗、光电对抗和声学对抗三段,各频段的划分如图 1-3 所示。

km		m		cm		mm		$\mu\text{m}$		nm	
$\lambda$	100 10	1(km) 100	10	1(m) 10	10	1(cm) 1(mm)	1(mm)	0.76	0.38( $\mu\text{m}$ )	10	
超低频 VLF 超长波	低频 LF 长波	中频 MF 中波	高频 HF 短波	甚高频 VHF 超短波	特高频 UHF 分米波	超高频 SHF 厘米波	极高频 EHF 毫米波	红外	可见光	紫外	
声学主频段			射频(雷达)主频段					光电主频段			
$f$	3 30	300(kHz) 3	30	300	3(GHz)	30	300(GHz)				
kHz			MHz			GHz		THz			

图 1-3 电子对抗的频段划分



### 1. 射频对抗

射频对抗的频率范围为 3 MHz~300 GHz, 是雷达、通信、导航、敌我识别、无线电引信等微波电子设备工作的主要频段。

### 2. 光电对抗

光电对抗的频率范围在 300 GHz 以上, 可进一步分为红外、可见光、激光、紫外等子频段, 是精确制导和定向能武器等工作的主要频段。

### 3. 声学对抗

声学对抗的频率范围主要在 3 MHz 以下, 是水下声呐、导航定位和制导兵器工作的主要频段。

## 1.2 雷达对抗的信号环境

雷达对抗的信号环境  $S$  是指其所在位置处各种电磁辐射、散射信号的全体:

$$S = \bigcup_{i=1}^N s_i(t) \quad (1-1)$$

式中,  $N$  为电磁辐射、散射源数量,  $s_i(t)$  为其中第  $i$  个源的信号。

### 1.2.1 雷达对抗系统中信号环境的描述

#### 1. 脉冲信号环境

对于式(1-1)中的脉冲雷达辐射信号, 可展开其射频脉冲序列:

$$\begin{cases} s_i(t) = \sum_j s_{i,j}(t) \\ s_{i,j}(t) = A_{i,j}(t - t_{i,j}) e^{j\varphi_{i,j}(t)} \\ A_{i,j}(t) > 0 \quad 0 \leq t < \tau_{i,j} \\ A_{i,j}(t) = 0 \quad \text{其它} \end{cases} \quad (1-2)$$

式中,  $s_{i,j}(t)$ 、 $A_{i,j}(t)$ 、 $t_{i,j}$ 、 $\tau_{i,j}$ 、 $\varphi_{i,j}(t)$  分别为第  $i$  部雷达第  $j$  个射频脉冲信号以及该信号的包络函数、到达时间、脉冲宽度和相位调制函数。下面分别介绍包络函数、到达时间、脉冲宽度和相位调制。

#### 1) 包络函数 $A_{i,j}(t)$

$$A_{i,j}(t) = P_i(R_{i,r}) G_r(\alpha_{i,r}, \beta_{i,r}) G_r(\alpha_i, \beta_i) a_i(t, \tau_{i,j}) \quad (1-3)$$

式中,  $P_i(R_{i,r})$ ,  $G_r(\alpha_{i,r}, \beta_{i,r})$ ,  $G_r(\alpha_i, \beta_i)$ ,  $a_i(t, \tau_{i,j})$  分别为在距离  $R_{i,r}$  处收到该雷达发射脉冲的功率, 雷达发射天线在接收方向  $\alpha_{i,r}$ 、 $\beta_{i,r}$  的增益, 侦察接收天线在雷达方向  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  的增益和归一化的脉冲形状函数。 $a_i(t, \tau_{i,j})$  可以表现出射频脉冲的振幅调制信息, 有时为了简化描述, 常用矩形脉冲函数近似:

$$a_i(t, \tau_{i,j}) = \text{rect}(t, \tau_{i,j}) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < \tau_{i,j} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (1-4)$$

#### 2) 到达时间 $t_{i,j}$

$$t_{i,j} = t_{i,j-1} + \text{PRI}_{i,j} \quad (1-5)$$