

# Analysis and Design of Reconnaissance Systems in Modern ESM

## 现代电子战支援侦察系统 分析与设计

刘永坚 司伟建 杨承志 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 现代电子战支援侦察系统 分析与设计

刘永坚 司伟建 杨承志 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书以现代电子战支援侦察系统为主线,主要介绍了现代电子战支援侦察系统的基本概念、接收机主要战术技术指标分析与设计、频率测量方法、常规测向方法、LPI 体制雷达信号的检测和识别、脉内调制雷达信号的参数估计,以及阵列误差背景下的高分辨率测向。

本书内容较为新颖,系统性强,突出了现代电子战支援侦察系统分析与设计的基础理论和应用理论知识,既可作为高等院校电子工程相关专业研究生和高年级本科生的电子战支援侦察课程教材或参考书,又可帮助电子战工程技术人员掌握对电子战支援侦察系统的分析与设计方法,以解决有关实际问题。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代电子战支援侦察系统分析与设计/刘永坚,司伟建,杨承志编著. —北京:国防工业出版社,2016. 12  
ISBN 978-7-118-10524-7

I. ①现… II. ①刘… ②司… ③杨… III. ①电子对抗—战斗支援—侦察系统—研究 IV. ①TN97②E87

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 240746 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 100048)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710×1000 1/16 印张 28 $\frac{3}{4}$  字数 578 千字

2016 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 168.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

电子战支援侦察是完成现代军事情报侦察和实施电子战的重要手段,是基于“网络中心战”架构的情报监视侦察系统重要组成部分,在现代战争中具有重要地位与作用。作为现代战争“杀手锏”的电子战装备,其实力与优劣已经成为衡量一个国家国防实力强弱的重要标准之一,可以毫不夸张地说,有多大的电子战实力,才能有希望打赢多大规模的战争。电子战支援侦察是电子战的主要内容之一,是利用电子战支援侦察系统搜索、截获敌方电子设备辐射的信号,测量信号特征参数(频率、脉宽、脉冲间隔和脉冲类型等)和到达时间,完成辐射源定位,通过被截获辐射源的关联,识别出武器系统,获取战场电磁威胁态势和实时生成战斗支援情报,主要装备于作战平台(如作战飞机、舰船等)上用作自卫的信号侦察与电子战支援设备(ESM),如雷达告警接收机,是电子战的先导和重要基础。

本书结合现代电子战侦察技术的迅速发展,介绍了现代电子战支援侦察系统分析与设计的基础理论与应用理论,较为系统地介绍了现代电子战支援侦察系统的基本概念、接收机主要战术技术指标分析与设计、频率测量方法、常规测向方法,LPI体制雷达信号的检测、识别,脉内调制雷达信号的参数估计,以及阵列误差背景下的高分辨率测向等内容,使读者能在学习电子战支援侦察系统理论的基础上,系统、全面、深入地了解 and 掌握电子战支援侦察系统的分析与设计方法,为开展电子战支援侦察系统的分析与设计工作提供基础理论、方法的支撑。

由于本书撰写的时间紧,涉及电子战支援侦察信号处理的新理论与新知识,还有待继续深入研究后整理成稿,后续出版。

本书是作者在电子战支援侦察领域积累了多年的工作经验,在现代电子战支援侦察系统理论与工程设计方面工作的积累与总结,并融入了作者的工程实践和一些科研成果,其目的是使读者能在学习电子战支援侦察系统理论的基础上,系统、全面、深入地了解 and 掌握电子战支援侦察系统的分析与设计方法。本书主要内容包括:现代电子战支援侦察系统的基本概念,接收机主要战术技术指标分析与设计,频率测量方法,常规测向方法,LPI体制雷达信号的检测、识别,脉内调制雷达信号的参数估计,以及阵列误差背景下的高分辨率测向。

本书的特点是:强化了专业术语的解释,构建了相应的数学模型,进行了严谨的

分析,给出了综合结论,为系统选型论证提供了设计方法,为工程设计提供了理论支撑。

本书第1、7、8、9章由刘永坚撰写,第2、3、4章由司伟建撰写,第5、6章由杨承志撰写。在本书的撰写过程中,得到了哈尔滨工程大学信息工程技术研究所曲志昱副教授、陈涛副教授,博士研究生吴迪、王利伟、吴娜、曲行根、赵滨娇的大力支持与帮助;空军航空大学李彦志教授、张国毅教授、杨建波教授等人提出了宝贵的修改意见;空军航空大学航空兵电子战实验室的肖鹏、吕亚昆、李建伟、张柏林、赵凯凯、庄宇、王龙等硕士研究生对文稿进行了认真校对;在此一并表示衷心感谢。

由于水平有限,缺点和不足在所难免,恳请有识之士和学界同仁批评指正。

编著者

2016年10月

# 目 录

第 1 章 电子战支援侦察系统的基本知识	1
1.1 电子战支援侦察的定义与面临的信号环境	1
1.1.1 电子战支援侦察的定义	1
1.1.2 电子战支援侦察的信号环境	1
1.2 现代电子战支援侦察系统的基本组成及技术特点	6
第 2 章 电子战支援侦察接收机主要战术技术指标分析与设计	9
2.1 电子战支援侦察接收机灵敏度与动态范围	9
2.1.1 电子战支援侦察接收机灵敏度通用计算公式	9
2.1.2 切线灵敏度分析与计算公式	12
2.1.3 工作灵敏度与侦察系统灵敏度	16
2.1.4 电子战支援侦察接收机的发现概率和虚警概率	17
2.1.5 截获概率和截获时间	43
2.2 电子战支援侦察接收机的动态范围	48
2.2.1 线性动态范围	48
2.2.2 单信号动态范围	49
2.2.3 无虚假动态范围	49
2.2.4 瞬时动态范围	53
2.2.5 接收机动态范围的估算	55
第 3 章 频率测量方法	59
3.1 概述	59

3.1.1	频率测量的重要性	59
3.1.2	对测频接收机的基本要求	59
3.1.3	测频技术分类	61
3.2	频率搜索接收机	62
3.2.1	搜索式超外差接收机	62
3.2.2	射频调谐(RFT)晶体视频接收机	66
3.3	比相法瞬时测频接收机	67
3.3.1	微波鉴相器(相关器)	67
3.3.2	极性量化器的基本工作原理	71
3.3.3	多路鉴相器的并行运用	73
3.3.4	对同时到达信号的分析与检测	74
3.4	信道化接收机	78
3.4.1	基本工作原理	78
3.4.2	信道化接收机频率折叠技术	82
3.4.3	信道化接收机几个主要指标的计算	87
3.5	声光接收机	91
3.5.1	声光接收机的基本工作原理	91
3.5.2	声光接收机的主要部件	92
3.6	压缩(微扫)接收机	102
3.6.1	脉冲压缩的工作原理	102
3.6.2	压缩接收机的工作原理	106
3.7	数字接收机	107
3.7.1	A/D技术	109
3.7.2	数字接收机中的采样	119
3.7.3	多速率信号处理	125
<b>第4章</b>	<b>常规测向方法</b>	<b>127</b>
4.1	概述	127
4.1.1	测向的目的	127

4.1.2	测向技术的分类 .....	127
4.1.3	对测向系统的基本要求 .....	128
4.2	搜索法测向 .....	129
4.2.1	方位搜索概率分析 .....	130
4.2.2	角度分辨率和测角精度分析 .....	133
4.2.3	相控阵天线搜索 .....	137
4.3	全向振幅单脉冲测向技术 .....	157
4.3.1	基本工作原理 .....	157
4.3.2	幅度比值的计算 .....	158
4.3.3	倾斜角与波束宽度的确定 .....	161
4.3.4	系统误差分析 .....	162
4.3.5	随机误差分析 .....	163
4.4	数字式相位干涉仪测向技术 .....	164
4.4.1	单基线相位干涉仪基本原理 .....	164
4.4.2	多基线解宽频带测向模糊 .....	167
4.5	线性相位多模圆阵测向技术 .....	173
4.5.1	远场方向性分析 .....	173
4.5.2	相位模式圆阵的激励网络的特性 .....	177
4.5.3	多模圆阵的工作原理及巴特勒矩阵的构造 .....	180
4.5.4	线性相位多模圆阵的测向系统 .....	182
4.5.5	阵元方向图对多模圆阵性能的影响 .....	183
4.6	时差测向方法 .....	187
4.6.1	时差测向的原理及误差分析 .....	187
4.6.2	时差测量问题 .....	190
4.7	空间谱超分辨测向方法 .....	192
4.7.1	MUSIC 算法基本原理 .....	192
4.7.2	典型阵列接收模型 .....	196
4.7.3	高分辨测向方法 .....	198
4.7.4	新算法小结 .....	207



<b>第 5 章 LPI 体制雷达信号的检测</b> .....	208
5.1 基于并行时频图像处理的 LPI 雷达信号检测方法 .....	208
5.1.1 现行信号检测方法的局限性 .....	208
5.1.2 新型 LPI 雷达信号截获策略的提出 .....	209
5.1.3 LPI 雷达信号的高概率截获 .....	210
5.1.4 基于 CWD 时频图像径向积分的检测方法 .....	213
5.1.5 基于 STFT 与 WVD 联合弱化交叉项的检测方法 .....	217
5.1.6 处理策略选取 .....	221
5.1.7 算法仿真及性能分析 .....	221
5.2 基于 PAHT 及频域检测的 LPI 雷达信号截获 .....	226
5.2.1 基于 PAHT 变换的 LPI 雷达信号检测方法 .....	226
5.2.2 基于 FFT 与分段自相关函数的频域检测方法 .....	233
5.2.3 仿真实验及结果分析 .....	235
5.3 基于盲处理的多分量条件下 LPI 信号的检测 .....	239
5.3.1 常规信号对 LPI 信号检测的影响 .....	239
5.3.2 现有多分量检测算法处理效果分析 .....	240
5.3.3 新的多分量分析处理模型 .....	244
5.3.4 基于 FastICA 的多分量雷达信号盲分离 .....	246
5.3.5 信号与噪声的判别方法 .....	254
5.3.6 仿真实验及结果分析 .....	255
<b>第 6 章 LPI 体制雷达信号的识别</b> .....	260
6.1 改进 BPR 算法在 LPI 雷达信号识别中的应用 .....	260
6.1.1 基于传统识别算法的分类器设计很难适应 LPI 雷达信号 .....	260
6.1.2 低截获概率雷达信号的识别新方法 .....	261
6.1.3 LPQ 特征向量提取方法的改进 .....	261
6.1.4 BPR 识别分类器性能分析 .....	263
6.1.5 改进 BPR 分类器设计的提出与实现 .....	266

6.1.6	实验数据分析 .....	271
6.2	基于PFRFT的LPI雷达信号波形识别算法 .....	273
6.2.1	LPI雷达信号脉内调制模型 .....	273
6.2.2	基于PFRFT的LPI信号识别算法 .....	274
6.2.3	算法总体流程 .....	279
6.2.4	仿真实验及结果分析 .....	279
6.3	基于隐马尔可夫模型的雷达辐射源识别算法 .....	282
6.3.1	算法数学分析与描述 .....	282
6.3.2	识别置信度与判决模型 .....	286
6.3.3	算法整体流程 .....	287
6.4	基于改进相位差分法的LPI雷达信号调制类型分类 .....	288
6.4.1	常规识别算法的局限性分析 .....	288
6.4.2	改进的短时傅里叶变换 .....	288
6.4.3	改进的相位差分法 .....	293
6.4.4	综合识别算法 .....	296
6.4.5	实验及性能分析 .....	303
6.5	雷达脉压信号脉内调制类型识别 .....	306
6.5.1	调制类型识别算法存在的问题 .....	307
6.5.2	脉内信噪比的估计 .....	307
6.5.3	基于AR功率谱的分类特征参数提取 .....	308
6.5.4	基于分类特征参数的信号识别 .....	312
6.5.5	仿真实验及性能分析 .....	316
6.5.6	小结 .....	318
<b>第7章</b>	<b>雷达信号的参数估计 .....</b>	<b>319</b>
7.1	调频信号的参数估计 .....	319
7.1.1	非线性调频信号的参数估计 .....	319
7.1.2	正弦调频连续波的参数估计 .....	324
7.1.3	线性调频连续波的参数估计 .....	327

7.1.4	小结 .....	338
7.2	频率编码信号参数估计 .....	338
7.2.1	概述 .....	338
7.2.2	非线性调频信号参数估计 .....	346
7.2.3	小结 .....	353
7.3	相位编码信号参数估计 .....	353
7.3.1	小波变换法的局限性 .....	353
7.3.2	改进尺度的小波变换法 .....	358
7.3.3	仿真实验及性能分析 .....	362
7.3.4	小结 .....	364
7.4	多相码信号参数估计 .....	364
7.4.1	传统算法局限性分析 .....	365
7.4.2	基于改进的 FrFT 的参数估计法 .....	370
7.4.3	性能分析及仿真实验 .....	374
7.4.4	小结 .....	377
7.5	混合调制信号参数估计 .....	378
7.5.1	FSK/PSK 信号参数估计 .....	378
7.5.2	PSK/FSK 信号参数估计 .....	384
7.5.3	小结 .....	388
<b>第 8 章</b>	<b>阵列误差背景下的高分辨率测向 .....</b>	<b>390</b>
8.1	幅相误差背景下的波达方向估计 .....	390
8.1.1	引言 .....	390
8.1.2	幅相误差的数学模型 .....	391
8.1.3	幅相误差对波达方向估计算法的影响 .....	391
8.1.4	基于均匀线阵的幅相误差自校正算法 .....	398
8.1.5	基于均匀圆阵的幅相误差有源校正算法 .....	405
8.1.6	基于均匀十字阵的幅相误差自校正算法 .....	410
8.1.7	小结 .....	414

8.2	互耦误差背景下的波达方向估计	415
8.2.1	引言	415
8.2.2	互耦误差的数学模型	415
8.2.3	互耦误差对波达方向估计算法的影响	416
8.2.4	基于均匀线阵的互耦误差自校正算法	421
8.2.5	基于均匀圆阵的互耦误差自校正算法	427
8.2.6	基于均匀十字阵的互耦误差自校正算法	431
8.2.7	小结	436
8.3	多误差背景下的波达方向估计	437
8.3.1	引言	437
8.3.2	基于均匀线阵的多误差数学模型	438
8.3.3	基于均匀线阵的多误差自校正算法	438
8.4	小结	444
	参考文献	446

# 第1章 电子战支援侦察系统的基本知识

## 1.1 电子战支援侦察的定义与面临的信号环境

### 1.1.1 电子战支援侦察的定义

电子战支援侦察是利用电子战支援侦察系统搜索、截获敌方电子设备辐射的信号,经过分析、识别得到电子设备的工作频率、工作方式、信号特征等技术参数,以及配置、地点和用途等情报,是获取战场电磁态势和战斗支援情报的重要手段,是电子战的先导和重要基础。

### 1.1.2 电子战支援侦察的信号环境

#### 1.1.2.1 电子战的频谱

电子战的频率范围非常广,从超低频 3kHz 一直到紫外线,如图 1.1 所示。

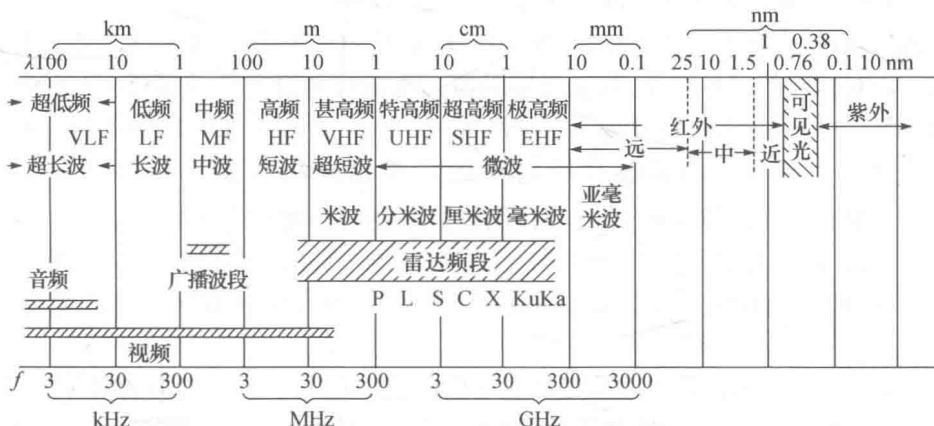


图 1.1 电磁波频谱图

#### 1.1.2.2 现代电子战支援侦察信号环境的特点

电子战支援侦察的信号环境与雷达的信号环境不同。雷达的信号环境包括目标、环境回波和人为的有源及无源干扰所产生的信号。雷达是窄波束窄频带工作的,它所接收到的信号除目标回波外还有环境杂波(如地物杂波、海浪杂波等)、人为的

干扰以及同频率的雷达信号。雷达在干扰背景下提取目标回波信号。电子战支援侦察的信号环境是由各种辐射源所形成的。电子战支援侦察系统通常在宽频带和宽空域工作,要随时截获各个辐射源的信号并进行分析和识别,进而判断所受到的威胁。所以电子战支援侦察信号环境随着辐射源数量日益增多而日臻复杂。

现代电子战支援侦察信号环境与过去(20世纪50年代及其以前)的电子战支援侦察信号环境不同。那时,辐射源数量不多,工作频率不变或慢变,工作时间长而且信号波形及参数不变,雷达和通信、导航设备各在不同频段上工作,信号形式也有明显差异。这样,电子战接收机可以采用窄波束、窄频带进行范围搜索,从而对各辐射源的信号进行分别处理。

现代电子战支援侦察信号环境的特点是:

- (1) 辐射源的数量日益增多,飞机或军舰上的电子战支援侦察系统可能受到数十甚至上百个辐射源的照射,因而信号密度大(可达几百万脉冲数每秒)。
- (2) 辐射源的体制多,波形复杂多变。
- (3) 辐射源的工作频段在不断扩展,而且不同辐射源(如通信、导航、雷达、制导系统)的工作频段在越来越宽的范围上重叠。
- (4) 辐射源信号在频域上拥挤,在时域上密集而且交迭在一起。
- (5) 制导武器的大量使用,使得电子战支援侦察信号环境里潜在的威胁在数量上和威胁程度上日益增大,要求电子战支援侦察系统必须快速、不间断、高可靠地进行信号处理,特别是要实时地确定威胁信号。

概括地说,现代电子战支援侦察信号环境的特点是密集的、复杂的、交错的和多变的。面对这样的信号环境,电子战支援侦察系统要对每个信号实现100%概率的截获,将每个辐射源的信号分选出来并识别,的确是一项十分复杂而艰巨的任务。

### 1.1.2.3 电子战支援侦察信号环境的定量描述和参数范围

设计电子战支援侦察系统时,其性能指标需要根据现代电子战支援侦察信号环境来确定;评价现有电子战支援侦察系统能否适应今后电子战支援侦察电子战支援信号环境,都需要对信号环境作定量的描述,以便得出能够表征信号环境特点的参数。

电子战支援侦察接收机在信号环境中所截获的信号中包括两类情报,一类是电子情报(ELINT),另一类是通信情报(COMINT),有时也把两者合称为信号情报(SI-GINT)。通信情报和电子情报在信号形式以及信号处理技术上都有很大不同。对通信信号处理的主要目的是得到通信内容。通信信号大多是连续波信号,而且通信系统多是窄带工作,所以,常以通信信号在频域上的密集程度和调制的多样性来表示信号环境的复杂性。

电子情报是指雷达、导航、制导等系统发射的信号所包含的信息,这些信号用于探测、定位、控制。所以,电子情报也称为非通信情报。电子情报的信号形式通常是

一个接一个的脉冲信号流。

用来定量描述电子情报信号环境的主要参数有信号密度及其分布、辐射源数量、频率范围、信号形式及其参数范围、威胁的紧迫性等。

### 1. 信号密度及其分布

信号密度是指接收点随机信号流的每秒平均脉冲数

信号密度这一参数说明信号环境在时域上对电子战支援侦察系统所提出的要求。因此,它是影响电子战支援侦察接收机性能设计的一项重要参数。

造成高密度信号环境的直接原因是辐射源数量的日益增多。辐射源的数量又与所在地区有关。据报道,现代高密度电子战支援侦察信号环境,例如中欧地区,大约包含 1600 个辐射源,它们每秒平均发射 120 ~ 200 万个脉冲。

环境的信号密度和进入电子战支援侦察系统的信号密度是有区别的。同样辐射源构成的信号环境,对于高灵敏度接收系统,由于它可侦收微弱信号,从而进入系统的信号密度就高;对于低灵敏度接收系统,由于它只能接收较强的信号,从而进入系统的信号密度就低得多。

雷达、制导等系统多工作在微波波段,受地面影响及地球曲率的限制,低空及地面的信号密度小,而高空的信号密度大。因此,地面及舰载电子战支援侦察系统的信号密度就比机载系统的低得多。

信号密度与接收机灵敏度及高度之间的关系示于图 1.2。这是在东、西德边界地区高密度非通信信号环境中进入系统的信号密度与接收机灵敏度、系统的高度之间的关系。可以明显地看出,当接收机灵敏度较低 ( $-60 \sim -70$  dBm) 时,进入系统的信号密度随着灵敏度的增高而迅速增高,信号密度主要取决于灵敏度;当接收机的灵敏度范围为  $-70 \sim -10^6$  dBm 时,进入系统的信号密度既与灵敏度有关又与高度有关;当接收机灵敏度更高时,则进入系统的信号密度主要与高度有关,也就是说,主要取决于空间的信号密度。从图中还可看出,当高度低于 1000 英尺 (约 300m) 时,由于空间的信号密度不高,即使对灵敏度很高的接收系统,进入系统的信号密度也不超过  $6 \times 10^4$  (脉冲数/s)。对于地面系统,其信号密度还会低些,例如只有  $(1 \sim 2) \times 10^4$  脉冲数/s 的量级。

影响进入电子战支援侦察系统的信号密度的因素还有工作频率范围和天线的方

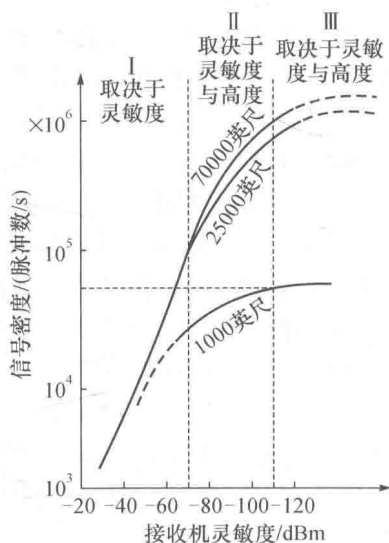


图 1.2 典型的高密度非通信信号环境(东、西德交界区)

向性。进入窄波束系统的信号密度比起全向系统的要低得多。假设来自各个方位的信号基本上是均匀的,则窄波束系统的信号密度要比全向系统的低  $\theta_r/360^\circ$  倍,  $\theta_r$  为侦察天线的波束宽度。同样,窄带系统的信号密度也要比宽带系统的低一个带宽比的倍数。

以下给出电子战支援侦察系统所面临的信号密度典型值:

- (1) 宽频段 0.1 ~ 40GHz、全向系统,信号密度可达 50 ~ 200 万脉冲数/s;
- (2) 窄带、窄波束的搜索系统,信号密度一般不超过 1 ~ 2 万脉冲数/s。

## 2. 辐射源数量

辐射源数量是形成高密度信号环境的直接原因,虽然其与信号密度紧密相关,但通常把其作为表征信号环境的一个参量。

辐射源数量在设计电子战支援侦察系统的数据库及确定显示终端的容量时都是应当考虑的指标要求。同时,用辐射源数量直接表示电子战支援侦察系统所面临的威胁,对指挥员的战斗指挥来说是很直观方便的。

设一个战区的辐射源数量为  $N$ ,则信号密度(按最高值估计)为  $\overline{NF_r}$ ,  $\overline{F_r}$  为各辐射源平均脉冲重复频率。

雷达的重复频率  $F_r$  一般在 100 ~ 10000 脉冲数/s 范围。警戒、引导雷达的  $F_r$  较低,一般为几百脉冲数/s,跟踪、火控雷达的  $F_r$  较高,通常为 1000 ~ 2000 脉冲数/s,弹上雷达还要高。所以对机载、舰载自卫电子战系统,  $F_r$  可取 1000 ~ 2000 脉冲数/s。这样对于信号密度为 10 万脉冲数/s 来说,就相当于 50 ~ 100 个辐射源的威胁。

辐射源数量与战区、作战对象以及目标性质有关。据有关资料预测,在机械化的师对师的战斗中,在 1000km<sup>2</sup> 范围内,辐射源数量在 500MHz 以下的频段里有 485 个,在 1 ~ 2GHz 频段内则只有 6 个,在 8 ~ 20GHz 内有 40 ~ 50 个。这说明,在师的战区中雷达频段(1 ~ 20GHz)里的辐射源数量是不多的。但对于军舰等高价值目标来说,它们面临的辐射源就会很多。例如,美舰载电子战系统 AN/SLQ - 32,频率范围为 0.5 ~ 18GHz,全方位,能同时对付 80 部雷达(包括  $F_r$  很高的弹上雷达)的威胁,可在 8 ~ 10 万脉冲数/s 的信号密度下工作。英国 Cutlass 舰载电子战系统,频率范围为 1 ~ 18GHz,全方位,能工作在 50 万脉冲数/s 的信号密度,能处理连续波、频率捷变、重频抖动等复杂雷达信号,程序库可存储 1000 个辐射源参数,显示器的处理器可存储 150 个实时测得的辐射源参数。

## 3. 频率范围

信号环境的频率范围是电子战支援侦察接收机必须截获的所有辐射源所占的频率范围。

机载电子战支援侦察系统面临 2 ~ 18GHz 的信号环境,因为它要对付的地面雷达、空中雷达、地 - 空、空 - 空导弹雷达的工作频率基本上都在此频率范围之内。舰载电子战支援侦察系统的频率范围应为 1 ~ 18GHz 或 0.4 ~ 18GHz,因为它要对付舰



上、岸上、空中的雷达及舰-舰、空-舰导弹上的雷达。随着雷达技术的发展,电子战的频率向更宽的范围扩展,目前在 $0.1 \sim 40\text{GHz}$ 。

#### 4. 信号形式及参数范围

信号形式及参数范围现代电子战支援侦察信号环境的另一重要特点是其信号形式的复杂性。能否处理复杂信号是一个电子战支援侦察系统性能优劣的重要标志。

电子战支援侦察信号环境中信号形式的复杂性来源于雷达技术的发展和体制的增多。通常,电子战支援侦察将信号形式分为常规信号和复杂信号两类。

常规信号指的是频率、脉冲宽度、重复频率都不变化的脉冲群信号。频率不变化是指在信号处理的取样时间里同一雷达的各脉冲频率不变化。不同体制的雷达,例如圆周扫描的警戒雷达,扇扫的测高雷达,圆锥扫描、单脉冲制的跟踪雷达,边扫描边跟踪雷达,只要其信号参数不变,都属于常规信号。它们的不同之处只表现在脉冲参数及天线调制上。

复杂信号是相对于常规信号而言的,常规信号以外的信号都称为复杂信号。复杂信号一般包括:

- (1) 重复周期(PRI)变化的脉冲信号(包括规律变化和随机跳变);
- (2) PRI参差的信号(有固定关系的几个重复使用的脉冲列);
- (3) 脉码、脉冲串信号;
- (4) 频率捷变(脉间跳频);
- (5) 组间频率跳变(每一脉冲组频率相同,脉冲组间作周期性的多频率的跳变);
- (6) 脉内调频(脉冲压缩信号,线性或非线性调频);
- (7) 脉内调相(脉冲压缩信号,在宽脉冲内改变每个子脉冲的相位);
- (8) 频率分集(脉冲参数不变,同时多频率);
- (9) 频谱扩展信号(信号占据很宽频谱而幅度很小);
- (10) 非正弦载波信号(噪声雷达、沃尔什波形雷达、冲击脉冲波雷达等)。

复杂信号增大了电子战支援侦察信号处理的复杂性和难度,对处理系统的精度、速率以及处理机的字长、容量都提出了高要求。

主要信号参数范围如下:

(1) 脉冲宽度(PW): $0.2 \sim 300\mu\text{s}$ 。精密跟踪雷达常采用很窄的脉冲,脉冲压缩雷达的脉冲很宽,一般为几十微秒到几百微秒。

(2) 脉冲重频(PRF): $100 \sim 100000$  脉冲数/s。远程警戒雷达PRF低,脉冲多普勒雷达常取几十至几百千赫的脉冲重复频率。

(3) 频率捷变的跳变量为中心频率的 $5\% \sim 15\%$ ,其绝对跳变频率量为 $200 \sim 500\text{MHz}$ ,捷变速度可达 $100\text{MHz}/100\text{ns}$ 。