



# 雷达信号 分选理论研究

国 强 著

 科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 雷达信号分选理论研究

国 强 著

1. 国家自然科学基金项目资助(60872108)
2. 中国博士后科学基金特别资助(200902411)
3. 中央高校基本科研业务费专项资金项目资助(HEUCFZ1015)

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

信号分选是电子对抗侦察系统的关键技术环节,是当前雷达对抗信号处理中的一个重要研究方向.本书总结了作者近年来的研究成果以及国内外这一领域的研究进展,对复杂环境下未知雷达辐射源信号分选所面临的关键理论问题进行了探索性、系统性的研究.全书由6章组成,主要内容有雷达信号分选的国内外研究现状与进展、雷达辐射源全脉冲信号模型分析、未知雷达辐射源信号分选模型结构、基于支持向量的多参数综合聚类信号分选、雷达信号分选的 $G$ 特征提取方法、基于全脉冲幅度信息分析的踏浪算法等.

本书是关于雷达信号分选理论与技术的一部专著,可作为高等学校和科研院所信号与信息处理、通信与信息系统等专业的研究生教材或参考书,也可供从事雷达、通信、导航与电子对抗等领域的广大技术人员学习与参考.

### 图书在版编目(CIP)数据

雷达信号分选理论研究/国强著. —北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-027915-6

I. 雷… II. 国… III. 雷达信号-信号分析-理论研究 IV. TN957.51

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第110042号

责任编辑: 郝德平 刘凤娟 / 责任校对: 陈玉凤

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

骏 杰 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010年5月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010年5月第一次印刷 印张: 6 1/4

印数: 1—2 000 字数: 120 000

定价: 38.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

雷达辐射源信号分选是现代高技术战争和将来的信息化战争中至关重要的环节,是网络中心战中感知的关键技术,是电子对抗以及多模复合制导中被动雷达寻的器的首要技术,也是当前电子情报侦察系统(ELINT)和电子支援系统(ESM)中的瓶颈技术.随着雷达的低截获概率(LPI)技术、脉内波形变换技术、多参数捷变等技术的发展,以及各种工作体制和多种抗干扰技术综合应用为特征的极为复杂的雷达信号环境的出现,给雷达信号分选提出了严峻挑战.

针对雷达对抗信号处理研究工作中迫切需要解决的关键理论问题,本书对复杂环境下未知雷达辐射源信号分选的体系结构和新方法进行了探索性和系统性的研究,获得了如下研究成果:

(1) 提出一种新的未知辐射源雷达信号分选模型结构.新分选模型结构打破了传统的基于五参数(DOA、RF、PRI、PW、TOA)的序贯分选模式,以一种新的思路研究复杂环境下未知雷达辐射源信号分选问题.提出了多参数综合信号分选的理念和信号分选特征提取的概念,将识别和评估机制引入信号分选系统,增加了基于脉冲幅度调制信息的信号分选环节.通过对新模型结构实现算法和实验验证的研究,证明了新模型结构比传统模型结构更加有效.

(2) 分析了雷达信号分选中的“容差”问题,传统的雷达信号分选方法是基于设定容差的,由此导致了最优边界的划分问题成为雷达信号分选领域近十几年发展中的难点问题.本书分别提出了基于支持向量聚类 and 分层互耦的分选算法、基于支持向量聚类和级联互耦的分选算法、基于支持向量和 K-Means 聚类的雷达信号分选算法.消除“容差”问题对雷达信号分选的影响.

(3) 提出“类型熵”和“密度熵”的概念来量化描述雷达辐射源全脉冲信号环境的复杂程度和密集程度,并将“类型熵”及“密度熵”的识别技术分别引入信号分选,与上述的几种聚类分选算法相结合,对聚类结果进行有效性评估,从而形成了联合信号分选/识别的新体制.

(4) 针对雷达辐射源信号瞬时脉冲参数的变化特点,提出了一种基于结构函数和经验模态分解的雷达全脉冲信号特征提取方法,可以从具有复杂变化特征的雷达全脉冲信号流中,提取出周期滑变特征—— $G$ 特征,从而为该类信号的分选提供可能.通过仿真实验,验证了这种特征提取方法的有效性.

(5) 提出了将全脉冲幅度调制信息用于信号分选的踏浪算法,分析了该算法的模型及其处理流程,并对测试结果进行了分析.

本书是在总结雷达信号分选领域国内外研究现状与进展的基础上,以作者近年来在该领域的研究成果为主要内容的一本专著.由于信号分选的研究是当前相关领域的研究热点,新的研究成果正在不断涌现,由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正.

感谢中国西南电子设备研究所的张锡祥院士、胡来招研究员、祝正威研究员、李峥研究员、哈尔滨工程大学的张兴周教授(我的博士生导师)的悉心指导,是以上前辈引导我进入了本书的研究领域,教给了我研究的方法、培养了我严谨的治学态度和求真务实的科研作风,使我受益终身.感谢哈尔滨工业大学的王常虹教授(我的博士后导师),我们长期的合作研究使我受益匪浅,不断进步.同时也感谢我的好友张葛祥博士、姜勤波博士、屈桢深博士、张晓林博士与我在学术上的交流及给予我的帮助与鼓励.

本书的出版得到国家自然科学基金委、中国教育部博士后基金委及科学出版社的大力支持,在此一并表示感谢!

国 强

2010年1月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 研究背景、研究目的和意义 .....	1
1.1.1 电子战的定义 .....	1
1.1.2 雷达侦察概述 .....	2
1.1.3 雷达信号分选在电子对抗中的意义 .....	3
1.1.4 本研究的意义 .....	4
1.2 雷达信号分选问题概述 .....	4
1.2.1 信号分选处理 .....	4
1.2.2 信号分选参数及脉冲描述字 .....	6
1.2.3 雷达侦察面临的信号环境及其对信号分选的影响 .....	6
1.3 国内外研究现状与进展 .....	7
1.4 本书的主要工作 .....	14
1.5 本书内容的结构安排 .....	16
<b>第 2 章 雷达辐射源全脉冲信号模型分析</b> .....	17
2.1 雷达辐射源信号分选环境的数学模型分析 .....	17
2.2 雷达辐射源信号的特征分析 .....	19
2.2.1 雷达信号的频域变化特征 .....	19
2.2.2 雷达信号的时域变化特征 .....	21
2.2.3 雷达信号的空域参数模型 .....	23
2.2.4 雷达信号的其他特征参数 .....	24
2.3 雷达信号的脉冲密度 .....	25
2.4 雷达信号环境脉冲丢失概率的分析 .....	25
2.4.1 运用随机过程理论的脉冲丢失概率分析 .....	26
2.4.2 运用概率统计理论的脉冲丢失概率分析 .....	27
2.4.3 一种关于修正脉冲丢失概率的分析 .....	28
2.5 本章小结 .....	29
<b>第 3 章 未知雷达辐射源信号分选模型结构</b> .....	30
3.1 传统分选模型结构 .....	30
3.2 新模型结构 .....	32

3.3	本章小结	34
<b>第 4 章</b>	<b>基于支持向量的多参数综合聚类信号分选</b>	<b>35</b>
4.1	统计学习理论	35
4.1.1	统计学习理论概述	35
4.1.2	统计学习理论的核心内容	36
4.2	目前多参数雷达信号分选方法中存在的主要问题	39
4.2.1	传统多参数雷达信号分选体制的不足	39
4.2.2	“容差”问题对雷达信号分选的影响	39
4.3	基于支持向量聚类和分层互耦的雷达信号分选系统	42
4.3.1	ESM 数据处理系统	43
4.3.2	基于支持向量聚类和分层互耦的分选算法	44
4.3.3	利用“熵”度量的雷达全脉冲信号识别方法	47
4.3.4	利用“类型熵”调节 SVC 聚类分选参数 $q$ 和 $C$	51
4.3.5	仿真试验结果	52
4.4	基于支持向量聚类和级联互耦的雷达信号分选系统	55
4.4.1	基于级联互耦和支持向量机的分段聚类信号分选算法	55
4.4.2	仿真试验分析	57
4.5	基于 SVC 和 K-Means 聚类的雷达全脉冲信号分选	59
4.5.1	基于质心的 K-Means 聚类信号分选分析	59
4.5.2	联合 SVC 和 K-Means 聚类的信号分选	63
4.5.3	仿真试验分析	64
4.6	本章小结	66
<b>第 5 章</b>	<b>雷达信号分选的 <math>G</math> 特征提取方法</b>	<b>67</b>
5.1	特征提取方法	67
5.1.1	预处理	67
5.1.2	结构函数	68
5.1.3	经验模态分解	69
5.2	仿真验证	72
5.3	本章小结	76
<b>第 6 章</b>	<b>基于全脉冲幅度信息分析的踏浪算法</b>	<b>77</b>
6.1	踏浪算法	77
6.1.1	对象分析	77
6.1.2	处理流程	78
6.1.3	初始化	78
6.1.4	转换参数及预处理	79

---

6.1.5	扩展 Kalman 滤波进行幅度估计 .....	80
6.1.6	幅度归属判决 .....	81
6.1.7	序列结束复合判断 .....	82
6.2	测试结果 .....	82
6.2.1	模拟结果 .....	82
6.2.2	典型分析的例子 .....	84
6.3	本章小结 .....	84
<b>参考文献</b>	.....	<b>85</b>



# 第1章 绪 论

## 1.1 研究背景、研究目的和意义

随着电子信息技术的飞速发展及其在军事领域的应用和普及, 电子信息技术已广泛渗透到各种武器装备和作战行动中, 成为现代战争的主流技术. 这使得现代战争形态由工业时代的机械化战争逐步转变为信息时代的信息化战争, 现代战争理念也由以机械化作战平台为中心的平台中心战逐步转变为以军事电子信息网络体系(C<sup>4</sup>ISR 系统) 为基础、信息斗争为核心的信息化战争, 即网络中心战, 夺取信息优势已成为争夺战争主动权并最终赢得战争的重要前提和保障.

在未来战争中, 首先进行的将是争夺“制电磁权”的全新形式的高技术战争, 信息战将贯穿整个战争过程. 信息化战争的一个重要特征是利用一切探测、感知手段, 借助通信、计算机及网络技术, 构建打击目标与武器的指挥控制回路, 实施实时的精确打击. 在信息化战争中, 空间信息探测、感知、识别、传输、处理、定位、决策、效能评估等功能, 主要依靠电子(包括光电) 技术来完成. 因此, 空间电子对抗被人们高度重视, 也是未来战争发展的必然趋势.

战场电磁环境监视与定位系统主要的应用方向为战场电子侦察、电子监视及国土防空体系探测定位网. 和平时期, 对周边国家和地区的电磁信号活动规律进行侦察监视, 可为我军电子战情报数据库的生成及更新提供素材. 战时, 对战场环境中敌我双方电磁辐射源的性能及分布位置实施实时监视, 以供战场指挥员了解敌我双方电磁斗争态势, 进行电磁频谱控制及指挥决策. 在国土防空中, 上述系统与现有的以雷达为主的有源探测网协同工作, 形成更加完善的国土防空体系.

本书的研究目的是: 为战场电磁环境监视与定位系统的研制提供技术; 解决复杂电磁信号环境下, 对各种雷达辐射源或电子装备的分析判断等问题; 为建立威胁库准备数据, 是战场电磁环境监视与定位系统的关键技术.

### 1.1.1 电子战的定义

电子战是现代化战争中进攻与防御的重要作战手段和重要作战方式. 西方国家称为“电子战(EW)”, 前苏联称为“无线电电子斗争”, 我国将其称为“电子对

抗”。电子战是敌我双方争夺电磁频谱使用权和控制权的斗争，它是用电磁能去测定、利用、削弱或以破坏、摧毁、扰乱手段阻止敌方、保护己方的电子对抗措施、反电子对抗措施、电子支援措施。电子战武器装备用于侦察战场电磁斗争态势，为指挥决策和电子战装备设计提供情报，为作战平台提供威胁警告，为电子攻击提供引导。电子战武器装备用于干扰、压制、反辐射摧毁敌方的目标探测、战场通信、指挥决策等 C<sup>4</sup>ISR 系统及精确制导武器系统，夺取战场电磁优势，进而夺取信息优势。

海湾战争后，美国参谋长联席会议备忘录 CJCS MOP6 对电子战进行了新的定义：电子战是使用电磁能和定向能控制电磁频谱或攻击敌军的任何军事行动。电子战包括三个主要部分。

(1) 电子攻击 (EA)。以削弱、抵消和摧毁敌方战斗能力为目的，使用电磁能或定向能攻击其人员、设施和装备。

(2) 电子防护 (EP)。为保护人员、设施和装备在己方实施电子战或敌方运用电子战削弱、抵消或摧毁己方战斗能力时不受任何影响而采取的各种行动。

(3) 电子战支援 (ES)。由作战指挥官分派或在其直接控制下，为搜索、截获、识别和定位有意或无意电磁辐射源，以达到立即辨认有威胁目的而实施的各种行动。

信息战是对抗双方在信息领域内的斗争，是为获取战场信息使用权和控制权的斗争。电磁频谱是现代战场信息流通的主渠道。现代电子战是在电磁频谱领域内应用电子战的手段去夺取战场信息优势的斗争，因此电子战（电子对抗）是战场信息战的主体。

### 1.1.2 雷达侦察概述

雷达对抗是电子战的主要组成部分。它是以雷达为主要作战对象，通过电子侦察获取敌方雷达、携带雷达的武器平台和雷达制导武器系统的技术参数及军事部署情报，并利用电子干扰、电子欺骗和电子攻击等软硬杀伤手段，削弱、破坏敌方雷达的作战效能而进行的电子斗争。雷达对抗的基本内容可分为雷达侦察、雷达干扰（电子软杀伤）和反辐射攻击（电子硬杀伤）三大技术领域。

雷达侦察的目的就是从敌方雷达发射的信号中检测有用的信息，并且与其他手段获得的信息综合在一起，引导我方做出及时、准确、有效的反应。雷达侦察是有效实施电子软硬杀伤的前提。

针对雷达侦察的不同应用场合，雷达侦察系统信号处理的目的是和方法也不尽相同（如图 1.1 所示），主要分为以下三个方面。

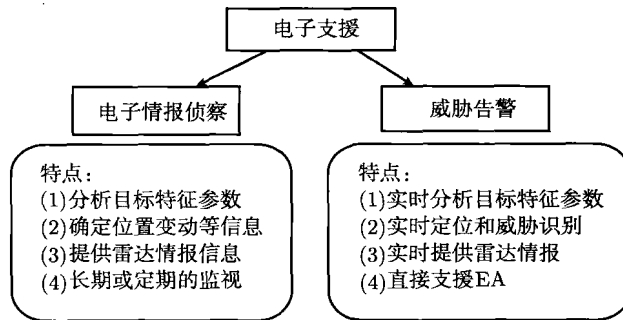


图 1.1 雷达侦察系统信号处理的任务

### 1) 雷达告警系统 (RWR)

雷达告警系统的主要用途是对高威胁雷达信号进行快速识别和告警。信号处理的目的是根据已知雷达的特征参数快速识别具有高威胁性的雷达信号，并及时采取恰当的对抗措施，而对其他雷达信号不太感兴趣。因此信号处理的方法是侧重快速可靠地分选和识别信号而不必在分析各种雷达的特征参数和信号细节方面太费工夫。

### 2) 电子情报侦察系统 (ELINT)

电子情报侦察系统的主要用途是获取雷达信号的特征参数和战场情报。信号处理的目的是要详细地了解信号环境中所有雷达信号的特征参数和地理分布，从中进一步判断这些雷达的用途、平台类别、配置的武器系统以及威胁等级，为战略情报分析提供依据，为寻的、告警和干扰系统提供识别高威胁信号的特征参数，而不必做出快速响应。因而信号处理的方法是尽量精确地测量和详细地分析各种雷达的特征参数，并收集、记录原始雷达信号，留待事后分析处理。

### 3) 电子支援系统 (ESM)

电子支援系统的主要用途是对高威胁雷达信号快速识别和告警，同时获取未知雷达信号的特征参数，经过分析和判别，补充到已知威胁雷达数据库中。信号处理的任務兼有雷达告警系统和电子情报侦察系统的功能，根据实际的工作环境和战术要求而有所侧重。

#### 1.1.3 雷达信号分选在电子对抗中的意义

雷达信号分选是现代高技术战争和将来的信息化战争中至关重要的环节，是网络中心战中感知的关键技术，是电子对抗以及多模复合制导中被动雷达寻的器的首要技术，也是当前电子情报侦察系统(ELINT)和电子支援系统(ESM)中的瓶颈技术。

雷达辐射源信号分选,特别是复杂电磁环境下未知参数的雷达辐射源信号分选是电子情报侦察系统和电子支援系统中的重要组成部分.只有在分选的基础上,才能对雷达辐射源信号参数进行分析和提取,对雷达类型和威胁性质进行识别,因此信号分选是电子对抗领域中的一个关键技术.目前信号分选能力已成为一个侦察系统能否适应现代电子对抗信号环境的根本标志.

#### 1.1.4 本研究的意义

现代雷达向多功能、多用途的方向发展,一部雷达可能有多种工作状态,具有多种体制,同时为了提高自身的性能和抗干扰的需要,往往采用各种复杂的波形设计.雷达信号的脉内调制特征有线性调频、非线性调频、二相编码、四相编码、频率编码等.脉间调制特征有频域调制和时域调制,频域调制特征有脉间频率捷变、脉组频率捷变、脉间频率调制、同时频率分集和分时频率分集等;时域调制特征有脉冲重复周期参差、抖动、组变、滑变和群脉冲、脉冲编码等;脉冲宽度也有组变和宽、窄脉冲组合等形式.上述复杂体制雷达的波形设计尽可能地破坏信号分选和识别所利用的信号规律.低截获概率(LPI)技术的采用更增加了信号分类和去交错处理的难度,使雷达侦察系统的截获概率受到极大影响.随着各种电子对抗设备数目的急剧增加,以及以各种工作体制和多种抗干扰技术综合应用为特征的极为复杂、密集的雷达信号环境的出现,雷达侦察系统信号处理的有效性和实时性将接受考验.基于以上原因,可以看出雷达接收机信号处理的复杂性及运算量主要集中在信号分选处理上.因此,深入研究能够适应现代高密度复杂信号环境下的脉冲去交错技术,探索研制新一代雷达截获接收机信号分选处理系统有着迫切的需求.信号分选的水平已成为衡量雷达对抗设备技术先进程度的重要标志.

针对雷达信号分选领域研究工作中迫切需要解决的关键问题,需要对雷达辐射源信号分选的体系结构和新方法进行理论探索和理论创新.

## 1.2 雷达信号分选问题概述

### 1.2.1 信号分选处理

现代雷达侦察信号处理系统的结构如图 1.2 所示.

上述信号处理系统的主要工作原理如下:

- (1) 截获脉冲信号参数的测量和量化,完成脉冲描述字的形成和组织;
- (2) 预处理器完成新、老信号脉冲分流;

- (3) 预处理器引导老信号脉冲按存储小盒存放;
- (4) 计算机通过软件完成信号分选和识别;
- (5) 处理软件优先对新信号进行处理以提高发现速度;
- (6) 处理软件对老信号进行定时监视;
- (7) 文件管理完成目标参数的管理和对外通信.

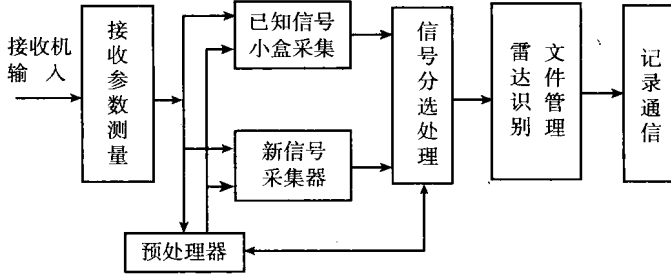


图 1.2 ESM 信号处理组成框图

信号分选处理的工作内容主要包括:

- (1) 控制硬件对输入脉冲的预处理和脉冲采集;
- (2) 对采集到的脉冲描述字进行方位、频域的预分选和时域的精分析,从复杂交错的脉冲流中分离出各部雷达目标的脉冲序列,求出雷达目标的特征参数;
- (3) 完成雷达的天线扫描分析;
- (4) 对分选结果进行相关处理(或二次处理);
- (5) 对处理结果进行管理.

从侦察接收机输出至信号处理系统的信号是密集交叠的视频脉冲流. 信号分选是信号处理系统中对视频脉冲流的信号处理过程,是从这种随机交叠的脉冲信号流中分离出各个雷达的脉冲列,并选出有用信号的过程,如图 1.3 所示.

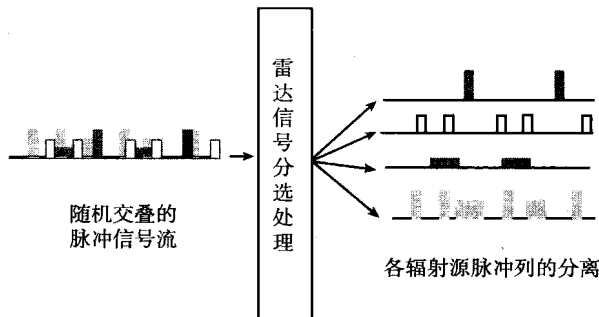


图 1.3 雷达侦察系统信号分选处理示意图

### 1.2.2 信号分选参数及脉冲描述字

在雷达信号侦察设备中,为了保证较高的信号截获概率,往往用频域宽开的接收方式.接收机接收的信号通过视频检波输出保宽和保幅脉冲,保宽脉冲经过量化得到脉冲到达时间 (TOA) 和脉冲宽度 (PW) 等参数,保幅脉冲经过量化后得到脉冲幅度 (PA) 等参数,再加上前端测频、测向得到的脉冲载频 (RF) 和脉冲到达角 (AOA) 等参数,它们一起构成了脉冲参数 (PDW),  $PDW = \{TOA, RF, PW, PA, AOA, PM, PP\}$ . 目前常用的雷达脉冲列参数见表 1.1.

表 1.1 雷达脉冲列参数

脉冲列参数		缩略符号
脉冲参数 (PDW)	脉冲到达时间	TOA
	脉冲载频	RF
	脉冲宽度	PW
	脉冲幅度	PA
	脉冲到达角	AOA
	脉内调制 (相位编码或频率调制)	PM
	极化特征	PP
脉间参数	脉冲重复周期或重复频率	PRI 或 PRF
	PRI 变化形式	$\{PRI_1, PRI_2, \dots\}$
	载频变化形式	$\{RF_1, RF_2, \dots\}$
	脉组变骨架周期	$T_d$

表征辐射源特征的参数主要有频域参数 (载波频率、频谱、频率变化规律及变化范围等)、空域参数 (信号的到达方向、方位角、仰角)、时域参数 (脉冲到达时间、脉冲宽度、脉冲重复周期及其变化规律、变化范围). 在上述参数中,主要的信号分选参数有脉冲到达时间 (TOA)、脉冲宽度 (PW)、脉冲重复周期 (PRI)、脉冲载频 (RF) 和脉冲信号的到达角 (AOA) 等五个参数. 其他的信号参数,如脉冲的幅度 (PA)、信号载频的跳变规律等,在当前国内外公开发表的相关文献中尚未用于自动信号分选,它们作为信号识别的重要参数,通常是在对信号分选后的单个雷达脉冲列信号分析的基础上提取出来的.

### 1.2.3 雷达侦察面临的信号环境及其对信号分选的影响

电子侦察面临的信号环境日趋复杂,主要表现在以下几个方面.

(1) 在现代战争中,不同功能和用途的雷达大量应用于战场上,雷达部署的空间已从地面、海上、空中向外层空间扩展,因此雷达侦察必须面对陆、海、空、天,全空域、全方位.

(2) 雷达的应用日益增多, 导致电磁信号环境高度密集. 未来的信号环境密集程度可能高达每秒 120 万以上个脉冲, 相当于 16000 个辐射源<sup>[1]</sup>.

(3) 随着新的雷达抗干扰波形和新的雷达体制的大量使用, 雷达占有的瞬时带宽正在不断拓宽, 例如, 脉间随机跳频和跳频带宽可达到吉赫兹 (GHz). 2010 年以后, 雷达侦察、告警的频率覆盖范围分别可达 10MHz~40GHz、75MHz~140GHz, 雷达干扰的频率覆盖范围将大于 40GHz. 这意味着雷达侦察系统正面临着极宽频带捷变雷达信号环境的威胁.

密集、复杂信号环境对信号分选有以下影响.

(1) 由于上述几方面的原因使得表征辐射源特征的时域、空域、频域参数都有可能发生全部重叠或部分重叠. 雷达信号分选处理中存在的“漏批”和“增批”现象将会变得越来越严重, 导致分选结果失效. 因此多参数分选中“容差”的选择问题变得越来越突出. 各维分选参数的最优边界划分, 已成为信号分选中急需解决的关键性问题.

(2) 信号环境的高度密集, 使得信号分选处理的计算量变大, 如果计算负荷超出信号处理系统的最高计算负荷, 则会出现系统饱和现象, 造成信息丢失和分选失效. 因此, 提高信号分选算法的处理速度, 也是信号分选研究的一个重要方面.

(3) 信号环境的高度复杂, 导致脉冲时间间隔 ( $\Delta TOA$ ) 的统计规律呈现随机非平稳特性. 这使得有效利用 TOA 维的信号分选信息将接受严峻考验.

所有利用电磁波作无线应用的用户都清楚自己所信号的信号的特征, 因此它们的信号处理针对性明确 (是匹配的), 无非是从信号中提取加载的信息, 为自己所用. 可以把它们理解成一个特殊的放大器, 它们对自己要用的信号有特别的增益而对其他的都没有, 因此, 很大程度上它没有或已经解决了信号分选的问题. 而对于雷达情报侦察, 事先不知道信号的特征 (是不匹配的), 这就增加了其信号分选处理的难度. 目前雷达信号的自动分选已经上升为整个雷达情报侦察技术中的一个瓶颈, 是关键的关键<sup>[2~12]</sup>.

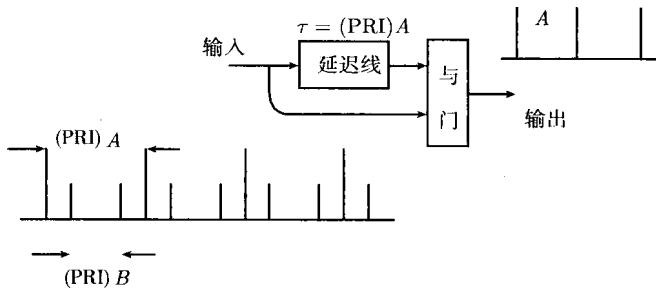
### 1.3 国内外研究现状与进展

复杂信号环境下雷达辐射源信号分选方法的研究开始于 20 世纪 70 年代, 早期 (七八十年代) 具有代表性的分选算法有 Davies、Campbell 等提出的序列搜索法<sup>[13~16]</sup>, Whittall、Rogers 提出的设定参数量化容差的小盒匹配法<sup>[17,18]</sup>, Mar-dia、Wilkinson 等提出的基于空间距离的多参数聚类法<sup>[19~22]</sup>. 从 20 世纪 80 年

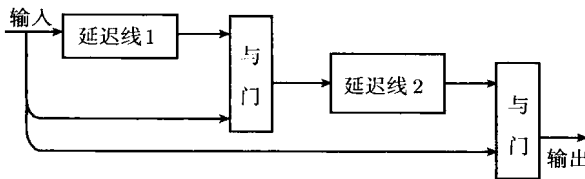
代开始, 相继出现了基于序列搜索和参数匹配原理的一些硬件处理方法, 举例如下.

1. 延迟相关式重频分选器<sup>[23~26]</sup>

利用周期脉冲列时域相关特性, 直接把脉冲流延迟, 然后重合选出所需要的脉冲列. 图 1.4(a) 中延迟式相关分选器的延迟线的延迟时间  $\tau$  等于某一预定的 PRI, 则输入信号经延迟后通过一重合门与未经延迟的信号进行比较, 便可从输入信号流中选出所需的脉冲列, 此时脉冲列的选择在第二个脉冲开始实施. 为了保证选择的可靠性, 可采用延迟式二次相关分选器, 这时要三个脉冲才可实现脉冲的选择. 如图 1.4(b) 所示.



(a) 延迟式相关分选器原理图



(b) 延迟式二次相关分选器脉冲列选择原理图

图 1.4 延迟相关式重频分选器原理图

上述基于硬件的延迟相关式重频分选器的原理是基于时域 PRI 分选的序列搜索法, 它适用于对指定辐射源的分选和跟踪. 其缺点在于: 电路规模与 PRI 参数的选择范围有关, 当可能的 PRI 范围较大时, 耗费的硬件资源很大.

2. 基于 CAM 的关联比较器<sup>[27~30]</sup>

CAM(content addressable memory) 是一种专门为快速查找数据地址而设计的存储器<sup>[31,32]</sup>. 基于 CAM 的关联比较器通过把输入数据与其所有存储单元的数据同时进行比较, 能快速确定输入数据是否与其内部某个数据或几个数据相匹配. CAM



的数据寻址方式因不同应用要求而不同,在最快方式下仅需要一个时钟周期便可完成对其内部所有数据的寻址.一种三参数关联比较器的原理示意图如图 1.5 所示.实时输入的 PDW 首先经过参数选择电路,选出其中的 AOA、RF、PW 三参数,经过数据驱动后,同时送给  $m$  个关联比较器,每一个关联比较器都预先存储一设定的参数范围,用  $[AOA_{\min}, AOA_{\max}]$ 、 $[RF_{\min}, RF_{\max}]$ 、 $[PW_{\min}, PW_{\max}]$  三个参数区间分别表示,它们的直积形成了雷达  $j$  的特征子空间  $R_j$ ,即

$$R_j = [AOA_{\min}^j, AOA_{\max}^j] \otimes [RF_{\min}^j, RF_{\max}^j] \otimes [PW_{\min}^j, PW_{\max}^j] \quad (1-1)$$

每一个关联比较器都是由三参数的上下限锁存器、比较器和与门组成的,由 PDW 的到达数据驱动,将每个到达 PDW 中的 AOA、RF、PW 三参数分别与关联比较器中的对应参数限进行比较.当满足

$$(AOA_{\min}^j \leq AOA \leq AOA_{\max}^j) \cap (RF_{\min}^j \leq RF \leq RF_{\max}^j) \cap (PW_{\min}^j \leq PW \leq PW_{\max}^j) \quad (1-2)$$

时,六个比较器输出的条件满足信号相与,产生数据选通信号,将此 PDW 写入雷达  $j$  的分选数据缓存器.图 1.5 给出了  $m$  个关联比较器的并行结构.

目前随着大规模可编程逻辑器件(如 FPGA、CPLD 等)的不断发展,及其在硬件分选处理器(延迟相关式重频分选器、基于 CAM 的关联比较器等)中的应用<sup>[33,38]</sup>,极大地增强了信号分选的处理能力,使得信号分选处理器在处理高密度脉冲流吞吐量时得到了显著提高.然而信号分选的硬件处理方法主要是针对已知参数特征或已知参数先验信息的雷达信号.在复杂密集的信号环境下,对未知雷达辐射源信号的分选,还主要采用计算机软件算法实现.

20 世纪 90 年代, Mardia 对 PRI 分选进行了深入研究,将直方图分析方法与序列搜索算法相结合,提出了累积差直方图(CDIF)算法<sup>[39,40]</sup>.CDIF 分选算法首先计算到达时间差(TOA 差),把相邻两个脉冲的到达时间差称为第一级差,每个脉冲与相邻第二个脉冲的到达时间差称为第二级差,以此类推.CDIF 累加每级 TOA 差的直方图值,将每级 TOA 差的直方图值和二倍差直方图值与门限比较,来确定可能的 PRI 值.然后利用可能的 PRI 值进行序列搜索从而将同一信号的脉冲列分选出来.CDIF 算法的缺陷在于:首先需要计算很多级 TOA 差值,即使对很简单的情况需要的级数也是很大的;其次最佳门限的选择问题很难解决,而且在丢失脉冲数增多的情况下,有可能检测出 PRI 的谐波,而不是 PRI 的真值.在 CDIF 算法的基础上, Milojevic 和 Popovic 提出了时序差直方图(SDIF)算法<sup>[41]</sup>.SDIF