

现代 电子战导论 (下)

司锡才 司伟建◎编著



哈尔滨工程大学出版社

现代电子战导论

(下)

司锡才 司伟建 编著

 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书论述了电子战的新概念、内涵、定义、主要内容以及原理、数学公式推导、计算方法、实现的技术措施与方法。电子战包括电子进攻、电子防护、电子支援。电子进攻包括反辐射武器攻击、定向能攻击、电磁欺骗、电磁干扰；电子防护包括对敌方电子进攻时，己方的电子防护，又包括己方、友方在使用电子进攻时，己方的电子防护；电子支援包括对敌方辐射源的探测、信号分析、识别、参数提取、定位和报警。与以前的同类书相比，本书增加了反辐射武器与定向能武器及其攻击；增加了己方与友方进行电子攻击时，己方的电子防护；增加了数字化测频、数字接收机测向，以及信号细微特征（“指纹”）分析、识别与提取，无源定位等新理论、新方法、新技术。

本书可作为各阶段信息对抗专业学生的教材，包括本科生、硕士及博士研究生，亦可供从事相关专业研究的科技人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

现代电子战导论. 下/司锡才, 司伟建编著. —哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2013. 8

ISBN 978 - 7 - 5661 - 0629 - 2

I. ①现… II. ①司…②司… III. ①电子对抗
IV. ①TN97

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 196698 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 肇东市一兴印刷有限公司
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 19.5
字 数 480 千字
版 次 2013 年 8 月第 1 版
印 次 2013 年 8 月第 1 次印刷
定 价 42.00 元
<http://www.hrbeupress.com>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前言

目前,世界正处于高技术战争时代,不久的将来(2030—2050年)将进入信息化战争时代。无论是高技术战争,还是信息化战争,电子战是战争的主要内容,是战争的主要手段。电子战的概念、内涵、内容随着时代的变化而变化,但电子战是战争永恒的话题。

信息化战争是扩大了的电子战,电子战是信息化战争的主要内容和支柱。信息化战争是电子战发展的必然。因此,要驾驭信息化战争,就必须掌握电子战理论、技术与方法。

本书为电子战的新概念注入了新内容:电子进攻中的反辐射武器攻击与定向能攻击。电子防护不仅是指敌人在电子进攻时己方要进行电子防护,而且己方或友方对敌实施电子进攻时,己方也要进行电子防护。电子支援除了过去采用的模拟手段实现侦察与报警,本书还增加了数字接收机,宽频数字信道化,信号细微特征(“指纹”)分析、识别与提取,超分辨高精度空间谱估计测向,立体基线测向,以及虚拟基线与立体基线解,超宽频带测向解,模糊、单站无源定位等一系列先进理论、技术与方法。

本书的内容比较丰富,知识面比较广,选用其中的部分内容可以作为信息对抗专业本科生的教材;还可以选用其中的部分内容作为硕士研究生的教材;本书与信息化战争导论联合在一起,选用相关的内容可作为博士研究生的教材。

论述电子战的新概念、新内容、新技术、新方法是本书的特点,因此本书既可作为各层次学生的教材或参考书,也可作为信息对抗或电子战专业人员的参考书。

本书在撰写过程中,参考或引用了国内外一些专家学者的论著,在此表示感谢!

由于编者水平所限,书中不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编著者

2013年1月

目 录

第 1 章 信号分选、选择与跟踪概述	1
1.1 基于 PRI 的信号分选	1
1.2 多参数匹配法	4
1.3 基于脉内调制特征的信号分选	4
1.4 基于盲信号处理的信号分选算法	6
1.5 聚类分选算法	6
1.6 基于神经网络和人工智能技术的信号分选	7
第 2 章 雷达脉冲参数测试	8
2.1 雷达脉冲信号的描述字	8
2.2 脉冲参数测试	9
2.3 脉冲重复频率测量及选择与跟踪	15
第 3 章 脉压雷达信号脉内细微特征(“指纹”)分析与提取	29
3.1 雷达脉压信号粗类识别	29
3.2 相位编码信号的参数估计	42
3.3 线性调频和非线性调频的参数估计	45
3.4 基于三次相位函数的 NLFM 信号参数估计算法	47
3.5 数据交换与处理	49
3.6 快速粗类型判别	50
3.7 三角函数快速查表计算	52
第 4 章 传统的信号分选方法	54
4.1 用直方图法分选复杂雷达信号	54
4.2 重复脉冲序列去交错技术	65
4.3 软件预分选	78
4.4 参数关联比分选技术	82
4.5 特殊雷达信号——脉冲重频滑变信号的分选	88
4.6 威胁信号分选系统	93
第 5 章 信号分选的新方法	117
5.1 基于盲源分离的信号分选	117
5.2 基于 Fast ICA 的雷达信号分选算法	120
5.3 基于伪信噪比最大化的盲源分离算法	128
5.4 基于峭度的盲源分离拟开关算法	134
5.5 雷达信号聚类分选方法	140
5.6 基于脉内调制特征的信号分选方法	150
5.7 基于宽带数字信道化的新型分选模型及新分选方法	163
5.8 基于纯相位向量和极化信息的预分选算法	168
5.9 平面变换法	174

第 6 章 传统的无源定位	184
6.1 单点定位法	184
6.2 方位/仰角定位法	184
6.3 测向 - 交叉定位法	185
6.4 测向 - 等角螺旋线航迹定位法	193
6.5 测向 - 时差定位法	196
6.6 测时差定位法	197
第 7 章 单站无源定位	199
7.1 单站无源定位与跟踪原理	199
7.2 机动测向机对运动辐射源的定位与跟踪	212
7.3 采用方位、多普勒频率测量运动辐射源定位与跟踪	220
7.4 采用到达方向、到达时间测量运动辐射源定位与跟踪	224
第 8 章 基于贝叶斯估计的粒子滤波无源定位与跟踪	237
8.1 贝叶斯估计理论	237
8.2 粒子滤波 PF 技术研究	238
8.3 粒子滤波在无源定位跟踪中的应用	241
第 9 章 UKF 算法无源定位与跟踪	247
9.1 UT 变换及 UKF 算法	247
9.2 算法性能仿真	250
9.3 利用 UKF 算法对匀速直线运动目标定位跟踪	252
9.4 利用 UKF 算法对机动目标跟踪	254
第 10 章 常用无源定位算法与切向运动测距定位技术	261
10.1 常用无源定位算法	261
10.2 利用切向运动测距定位的技术	274
参考文献	299

第 1 章 信号分选、选择与跟踪概述

信号分选、选择与跟踪是电子战中电子支援侦察接收机及宽频带被动雷达寻的器(或导引头)在复杂电磁环境中的关键技术,备受各国的重视和专家的青睐。

传统的信号分选是对视频信号的处理过程,人们很自然地首先选用时域参数作为分选参数,而且首先发展起来的是单参数分选技术,后来才研究多参数分选技术。根据所采用的分选参数和分选功能,通常有下列分选技术。

(1)重频分选 脉冲重频(Pulse Repetition Frequency, PRF)是用单个参数进行辐射源识别时最具有特征的参数,也是最早采用的信号分选参数。利用脉冲重复周期(Pulse Repetition Interval, PRI)的相关性可以比较容易地从交叠信号中分离出各雷达的脉冲列。

(2)脉宽和脉冲重复周期两个参数的分选 这属于时域多参数分选,它比单依靠 PRF 一个参数的分选功能强。在密集信号条件下,只用重频一个参数分选,其分选时间很长,特别是在多个 PRI 抖动、跳变或周期调制的情况下,甚至无法实现信号分选。加上脉宽参数的分选,就可以大大缩短按重频分选的时间,且有利于用对宽脉冲、窄脉冲等特殊雷达信号的分选和对重复周期变化的信号的分选。

(3)时域、频域多参数分选 为了对捷变频和频率分集雷达信号进行分选和识别,要求接收系统必须对每个脉冲信号进行准确测频,并且在分选过程中首先对每个脉冲的射频、到达时间、脉宽、脉幅等进行相关处理,然后进行载频、脉宽、重复周期的多参数信号分选。

(4)空域、频域、时域多参数分选 当密集信号流中包含多个频域上变化和时域上变化的脉冲列时,若只用频域、时域信号参数进行分选很难完成分选任务,这就需要对空域到达方向这一信号参数进行综合分选。这时要求接收系统能对每个到来的脉冲进行准确的测向、测频,并且对每个脉冲进行到达方向、载频、到达时间、脉宽、脉幅等相关处理,然后进行综合参数分选。准确的到达方向是最有力的分选参数,因为目标的空间位置在短时间内是不会突变的,因此信号的到达方向也不会突变。用精确的到达方向作为密集、复杂信号流的预分选,是解决各类频域捷变、时域捷变信号分选而不产生虚警和错误的可靠途径。

综上所述,信号分选可具有以下几种模式:①PRI 时域单参数分选;②PRI 加 PW 时域多参数分选;③PRI, PW 加 CF 多参数综合分选;④PRI, PW 加 AOA 多参数综合分选;⑤PRI, PW 加 CF, AOA 多参数综合分选。从以上各分选方法也可以看出,利用的参数越多,分选就越有利,而 PRI 分选是各种分选最终都需要的分选手段。

1.1 基于 PRI 的信号分选

在各种信号分选模式中, PRI 分选是各种分选方法中都需要的分选手段。因此,其他各参数的分选都可看作预分选, PRI 分选是最终的分选,是各种信号分选模式的基础。基于 PRI 的分选法一直是信号分选中研究最多且成果最为丰富的方法之一,动态扩展关联法、PRI 直方图、PRI 变换法、平面变换都是这类方法的典型代表。目前,这类方法是现役的

ESM 系统或被动雷达寻的器系统中最为流行的方法,它可以通过纯软件方式实现,也可通过软硬件结合处理甚至采用专用分选器件来实现。

1.1.1 动态扩展关联法

动态扩展关联法,就是俗称的“套”脉冲法,又称为序列搜索法、PRI 搜索法、PRI 试探法,它是一种经典的信号分选提取方法。其工作原理是在一个脉冲群内,首先选择一个脉冲作为基准脉冲,并假设它与下一个脉冲成对,用这两个脉冲形成的间隔在时间上向前或向后进行扩展试探。若此间隔能连续“套”到若干个脉冲(达到确定一系列信号的门限值),则认为已确定出一列信号,然后把与此信号相关联的脉冲从脉冲群中删去,对剩余脉冲流再重复此过程。动态扩展关联法比较关键的问题包括 PRI 容差的选择、参差鉴别及脉冲丢失概率等。此方法特别适用于已知可能出现的 PRI 或工作在数据库方式,故将此方法与后面提到的 SDIF 算法综合使用,分选速度快,成功率高,可获得较好的分选效果。

1.1.2 PRI 直方图法

PRI 直方图法包括差直方图法、积累差直方图(CDIF)以及时序差直方图(SDIF)。差直方图法的基本原理是对两两脉冲的间隔进行计数,从中提取出可能的 PRI。它不是用某一脉冲形成的间隔去“套”下一个脉冲,而是计算脉冲群内任意两个脉冲的到达时间差(DTOA)。对介于辐射源可能的最大 PRI 与最小 PRI 之间的 DTOA,分别统计每个 DTOA 对应的脉冲数,并作出脉冲数与 DTOA 的直方图,即 TOA 差直方图,然后再根据一定的分选准则对 TOA 差直方图进行分析,找出可能的 PRI,达到分选的目的。

差直方图法的主要缺点:鉴于 PRI 的倍数、和数、差数的统计值较大,故确定门限比较困难;当脉冲数较多时,分选容易出错,有时甚至不可能分选;只适合固定 PRI,所需计算的差值数较多且谐波问题严重等。

此后,Mardia 等人对 PRI 分选进行了深入研究,在传统直方图分析方法的基础上结合序列搜索算法,提出了 CDIF 算法和一种自适应 ESM 接收机分选算法结构。Milojevic 等人又对 CDIF 算法进行改进,提出了 SDIF 算法,这种算法在运算速度和防止虚假目标方面进行了较大改进,是复杂信号分选处理器较常采用的算法。

CDIF 算法是基于周期信号脉冲时间相关原理的一种去交错算法,它是将 TOA 差直方图法和序列搜索法相结合起来的一种方法。CDIF 算法的步骤是:首先计算一级差直方图,即计算所有相邻两个脉冲的 DTOA,并作 DTOA 直方图;再对最小的 PRI 和 2PRI 进行检测,如果均超过预设门限,则以该 PRI 进行序列搜索和提取,并对剩余脉冲序列重复上面的步骤,直到缓冲器中没有足够的脉冲形成脉冲序列;如果此时序列搜索失败,则以本级直方图中下一个符合条件的 PRI 进行序列搜索,假如本级直方图中均没有符合条件的 PRI,则计算下一级的差直方图,并与前一级差直方图进行累加,然后重复以上步骤找出可能的 PRI;以此类推,直到所有的脉冲序列被分选出来或直方图阶数达到预先给定的值为止。CDIF 算法较传统的差直方图方法在计算量和抑制谐波方面作了很大的改进,并且由于累积的效果,使得 CDIF 还具有对于干扰脉冲和脉冲丢失不敏感的特点。

SDIF 是一种基于 CDIF 的改进算法。SDIF 与 CDIF 的主要区别是:SDIF 对不同阶的到达时间差直方图的统计结果不进行累积,其相应的检测门限也与 CDIF 不同。SDIF 的优点在于相对 CDIF 减少了计算量,但由于不进行级间积累,其性能有所下降。

CDIF 和 SDIF 算法一经提出后,便受到工程界的普遍关注。国内外许多学者也对其进行了广泛而深入的研究,并结合实际情况提出了一些具体的改进措施。PRI 直方图法最大的优点在于简单、直观、算法易于工程实现,但直方图在脉冲较多时运算量将急剧增加,且脉冲列较多、漏失脉冲较多时分选效果不是很理想。另外,直方图主要适合于 PRI 固定或抖动量较小的雷达信号。

1.1.3 基于 PRI 变换的分选算法

直方图法提取 PRI 实际上都是在计算脉冲序列的自相关函数,由于周期信号的相关函数仍然是周期函数,所以在进行检测时,很容易出现信号的脉冲重复间隔及其子谐波同时出现的情况。针对这个问题,国外学者 Nishiguchi 提出一种叫做 PRI 变换法的算法,这种方法能够很好地抑制子谐波问题。接着又对这种算法作了两点改进,采用可移动的起始时间和交叠 PRI 小盒方法,使修正的 PRI 变换法对于脉冲重复间隔固定、抖动和滑变的雷达脉冲信号都有很好的检测效果,但是对重频参差的脉冲序列却仍然不适用。

在这之后,国内很多学者在修正的 PRI 变换法基础上提出许多改进方法,主要有:王兴颖研究了该算法对固定重频、参差重频、抖动重频、滑变重频的适用性;陈国海对该算法进行了计算机仿真和分析;杨文华将 PRI 变换和 SDIF 法进行组合用于分选参差脉冲列或相同 PRI 的多部雷达脉冲列;姜勤波提出一种新的方正弦波插值算法,其核心是把不等间隔的到达时间序列变换成连续信号,然后利用 FFT 算法提取重复周期,并用滤波技术和过零检测形成波门提取周期序列;李杨寰提出一种新的基于频谱分析的脉冲重复频率估计方法,该算法先对信号的 TOA 序列插值,然后采样进行 FFT 计算得到频谱,最后对其频谱进行加权等处理得到 PRF 估计值;安振进行了 PRI 变换对脉冲雷达信号 PRI 检测的性能分析。

这些研究基本是进行计算机的仿真,都没有在工程上提出具体的硬件实现的方法,直到 2008 年,司锡才、马晓东等在修正的 PRI 变换法基础上提出了一种基于 PRI 谱的雷达信号分选算法,同时构建了一种预分选、主分选结合的新型分选平台。这是国内首次用硬件实现该算法,验证了该方法从根本上解决了二次谐波抑制的问题,用来检测由多个具有恒定 PRI 脉冲组成的脉冲串的 PRI 很有效。但是,它的运算量极大,不仅要基于每一对 TOA 之差进行运算,还要对相应的每个 TOA 进行复指数计算,所以实时性还是不够理想。

1.1.4 基于平面变换的分选算法

1997 年,赵仁健等提出了用于密集信号分选的平面变换技术的概念,这种技术将密集射频频脉冲信号分段截取并逐行在平面上显示,通过平面显示宽度的变换,得到表征信号特征的调制曲线,从而实现信号分选的目的。2005 年,樊甫华提出自动搜索周期性对称调制模式的快速算法;孟建则在平面变换基础上提出一种从信号 TOA 得到信号瞬时 PRI 的重复周期变换,该方法由于不需要调节平面显示宽度,所以更加实用。此后,司锡才、刘鑫等又结合平面变换法及具体工程需要提出矩阵匹配法,并初步在硬件平台上实现,验证并得出该算法分选结果准确、具有一定的抗干扰能力、分选能力强等优点,但是由于计算复杂,系统的实时性还是不够理想。

基于 PRI 的信号分选算法一直都是研究的重点,上述各种基于 PRI 的分选方法的特点是,只利用信号的 TOA 信息。这些算法各有优缺点,如动态扩展关联法简单,但是主要适用于 PRI 固定的雷达信号;直方图在一定程度上对漏失脉冲的敏感性降低,但是在脉冲

数增加时运算量相对较大;PRI 变换在抑制谐波方面性能显著,但计算复杂实时性不好;而平面变换适合复杂 PRI 调制信号,但所需要脉冲数较多且自动分选较难。

1.2 多参数匹配法

早期的电磁环境相对简单,辐射源数量少,信号形式单一且参数相对固定,针对装订辐射源的分选方法便可取得好的效果,这种方法便是人们常说的模板匹配法。该方法事先装订好一些已知雷达的主要参数和特性,然后通过逐一匹配比较实现辐射源信号的分选识别。

多参数匹配法就起源于模板匹配法,发展到现在大都被称为多参数匹配法或多参数关联比较器,可近似将其看作模板匹配法的硬件实现。它是预分选的具体实现方法之一,基本实现原理为:首先将多个待分选辐射源有关参数(通常为 DOA, CF, PW)的上下限值预设关联比较器中,然后对每个接收脉冲的 PDW 进行并行关联比较、分组、存储,从而达到去交错的目的。

多参数关联比较器的实现离不开内容可寻址存储器(CAM)和关联比较器(AC),这种思想首先是由 Kohonen 和 Hanna 等人提出的。CAM 和 AC 可同时将输入于所有存储单元中的内容进行比较,并给出匹配单元的地址。1987 年,IBM 公司研制出第一套使用 AC 芯片的 ESM 系统,使雷达信号的分选能力显著提高。1991 年,CR 公司研制出基于 CAM 的关联处理器,极大地提高了处理的并行性。之后 Altera 和 Xilinx 公司又推出可实现 CAM 的现场可编程门阵列器件(FPGA),为相关研究提供了非常有利的条件。

基于硬件的关联比较实际上只是多参数匹配算法的一种具体实现形式,在人们大力研究基于 PRI 分选算法的同时,许多学者还提出了多参数分选的思想。Wikinson 和 Watson 使用 DOA, CF, PW 参数来研究密集环境中的雷达信号分选问题;Mardia 提出一种基于 CAM 的自适应多维聚类方案;Hassan 提出了一种基于自适应开窗的联合分选识别方法。在国内,才军、高纪明、赵建民讨论了基于 FPGA 和 CPLD 的三参数关联比较器的硬件实现;徐欣研究了雷达截获系统实时信号分选处理技术,还研究了基于 CAM 的多参数关联比较方法,并指出硬件实现在实时去交错中的重要性;王石记、司锡才则提出一种软硬件结合的基于概率统计和流分析相关提取的分选方法,具有较快的预分选速度;徐海源等也对该领域作了一些研究工作。

在一些专门针对个体或少数辐射源的分选情况下,多参数匹配法简单快速。因此在某些特定场合,该方法是一种不错的选择,特别是在已知一些先验知识的条件下,比如分选有先验知识的脉间波形变换雷达信号就非常有效。

1.3 基于脉内调制特征的信号分选

对分选来说,重要的不是一个模式的完整描述,而是导致区别不同类别模式的那些“选择性”信息的提取。也就是说,特征提取的主要目的是尽可能集中表征显著类别差异的模式信息,另一个目的则是尽可能缩小数据集,以提高识别效率,减少计算量。脉内调制特征作为分选参数是近年来人们的一种普遍共识,也是极有可能提高当前辐射源信号分选能力

的一种途径和思路。

雷达信号脉内调制可以分为脉内有意调制和脉内无意调制。脉内有意调制又称功能性调制,是指雷达为提高其检测性能、对抗侦察和干扰措施而采取的特定调制样式,如线性调频、非线性调频、频率编码、相位编码等。现代雷达广泛采用的脉内有意调制技术可以分为相位调制、频率调制、幅度调制或三种调制组合的混合调制。对脉内有意调制方式的识别提取,从调制方式的变化上为雷达信号的进一步识别提供了一种与常规方法不同的全新手段。通过对信号脉内信息的详细记录和分析,保留了有关信号更加完备的信息特征,为脉间参数变化(如频率捷变、频率分集、脉冲多普勒、重频参差抖动等)的新体制雷达信号的分选与识别提供了一个更强有力的手段。

国外, Delpart 提出脉内瞬时频率特征提取的小波渐近方法; Moraitakis 通过时频分析的方法提取线性和双曲线调制 Chirp 信号的特征参数; Gustavo 提出了一种基于时频分析的具有脉内特征分析能力的数字信道化接收机方案。在国内,穆世强、巫胜洪先后对常见的脉内特征提取方法进行了综述,这些方法包括时域自相关法、调制域分析法、时域倒频谱法、数字中频法等;另一方面,黄知涛、魏跃敏等提出了自动脉内调制特性分析的相对无模糊相位重构方法;毕大平提出易于工程实现的脉内瞬时频率提取技术;张葛祥等先后提取了雷达辐射源信号的小波包特征、相像系数特征、复杂度特征、分形盒维数和信息维数以及熵特征,并结合神经网络和支持向量机等方法对辐射源信号进行识别。

脉内无意调制(Unmeant Modulation of Pulse, UMOP)也称脉内附带调制,或雷达信号的个体特征(或信号细微特征)、雷达信号的“指纹”。它是因雷达采用某种形式的调制器而附加在雷达信号上的固有特性,难以完全消除,如幅度起伏、频率漂移等。其调制量的大小和形式取决于雷达体制、发射机类型、发射管、调制器、高压电源等多种综合因素,在发射端主要表现为频推效应、频牵效应、上升延迟、下降延迟和其他效应(如老化和温漂),即使是设计相同的一批雷达中的每部雷达,总有不同的无意调制分布,因为类同的部件在性能上仍有细微的差异。在侦收信号的调制特性上表现为无意调频、无意调相和无意调幅。简单来说,它一般是由于大功率雷达发射机的发射管、调制器 and 高压电源等器件或电路产生的所不希望的各种寄生调制。

对于无意调制特征的提取, Kawalec 指出,个体辐射源识别(Specific Emitter Identification, SEI)的关键是提取信号的无意调制,文献进一步给出了提取时频域特征及信号选择和分类方面的一些观点,并用上升/下降时间、上升/下降角度、倾斜时间等新参数对9个同类辐射源进行分选识别;张国柱采用小波变换对脉冲信号包络进行了特征提取;柳征采用小波包对原始信号进行了特征提取。

无意调制本身在雷达信号中是存在的,又能体现每部雷达的个体差异。正是由于每一部雷达无意调制特征的唯一性和特殊性,所以个体特征又称“雷达指纹”。因此,对雷达信号无意调制的分析可以为每一部雷达建立相应的“指纹”档案,与其他参数一起可以唯一识别出某一部特定的雷达,从而准确提供有关敌方雷达配置、调动等重要的军事情报。特别是现代雷达具有多种工作方式和复杂的调制波形,能在脉间改变其脉内有意调制特征,使雷达信号的分选和识别变得非常困难。因此,脉内无意调制特征拥有在密集复杂的信号环境中对雷达进行识别、分析和告警的巨大潜力。换句话说,传统的辐射源信息,如载频、重频、脉宽和有意调制特征等参数仅能实现辐射源类型识别,而个体特征识别研究立足于从侦测的辐射源信号中提取更加细微且稳健的特征信息,这些特征信息仅由特定辐射源个体

唯一决定,即辐射源“指纹”,从而实现对特定辐射源的个体识别。相信不久的将来,个体特征识别将作为对抗脉间波形变换雷达信号(脉宽、载频、脉冲重复周期、脉内有意调制方式均有变化的雷达脉冲信号)的最好方式之一。

1.4 基于盲信号处理的信号分选算法

随着现代电子战的激烈对抗,各种电子对抗设备数目急剧增加,电磁威胁环境的信号密度已高达百万量级。信号环境高度密集,空间信号的混叠程度越来越严重,同时到达信号越来越多。此外,低截获概率雷达信号的广泛应用使得空间出现大脉宽覆盖小脉宽的现象越来越多。传统的分选模型是一种串行规则的单脉冲检测系统,无法处理同时到达信号及大脉宽覆盖小脉宽的信号,也就无法胜任当前环境下的雷达信号分选。因此,空间未知混叠雷达信号的分离是摆在信号分选面前最为严峻的问题。近年兴起的盲源分离技术可以较好地解决复杂环境背景下信号分离的问题,它无需学习样本的选取,只需根据接收设备所获取的各辐射源信号进行处理,就可以恢复源信号。特别地,对于同时到达信号和连续波信号的处理优势显得更加突出。

在盲信源分离中,首先是 Herault 和 Jutten 等人引入了独立分量分析(Independent Component Analysis, ICA)的一般框架,Comon 对这种框架进行了详细的叙述。ICA 可以看作是主分量分析(Principal Component Analysis, PCA)和因子分析方法的进一步发展。Bell 致力于 ICA 信息最大化方法的研究,并首次得到了基于矩阵求逆运算,从而大大加快了算法的收敛性。与此同时,Cardoso 也进行了类似的研究,并得到了适用于实际问题的 ICA 信息最大化算法,但最初的这种算法只适用于超高斯分布的信息混合时的盲分离。Te - Won Lee 意识到将信息最大化算法推广到任意非高斯信号源的关键是估计信号源的高矩阵,然后对算法进行适当的变换,提出一种适用于普通非高斯信号的 ICA 信息最大化算法。Amari 等人提出了自然梯度算法,并从黎曼几何的角度阐明了这类算法的有效工作原理。自然梯度算法由于消除了矩阵求逆所带来的问题,因而使得许多算法对实际信号处理成为可能。在盲信源分离中,还有几种其他方法,比如最大似然法、基于累积量的 Bussgang 法、投影追踪法和负熵方法等,所有这些方法都与信息最大化的框架有关。许多不同领域的专家在信息最大化原则下,从不同的观点研究 ICA,最终得到易于理解的 ICA 算法。

在国内也有一些学者从事盲信源分离,特别是独立分量分析理论和应用技术的研究。刘琚和何振业、张贤达教授和保铮院士从不同方面对盲分离技术以及发展方向进行了综述,张贤达教授和保铮院士在其著作《通信信号处理》中对盲分离进行了更为详尽的介绍。随着分离算法的深入研究,近年来盲源分离算法也陆续出现在雷达信号分选应用领域。

1.5 聚类分选算法

用聚类分析来实现脉冲列去交错一直是雷达信号分选的重要方法,它是一种无监督的学习方法,通过将数据集中的样本按一定的相似性度量和评价准则进行归并分类,聚类方法可发现数据集的内在组织结构,以便于人们更好地理解数据。对于电子侦察而言,对截

获的脉冲流一般缺少必要的先验信息,也无法确切知道截获信号的类别数目,因此本质上属于典型无监督分类问题。从聚类的观点来看信号分选问题,每个辐射源相当于一个信号类,每个脉冲相当于相应辐射源的一次观测样本,每个脉冲的 PDW 参数个数相当于特征维数。只要所选择的特征具有较好的类内聚集性和类间分离性,理论上便可实现较好的分选效果。在这个方面,1992 年 Chandra 考虑了一种两阶段的适用于频率捷变频信号的分选方法,该方法首先通过 DOA 和 CF 参数聚类,且容差开始时固定,随着数据点增加后逐渐减少,之后用 PRI, PW 参数对聚类后的平均值进行再处理;Eric 提出一种在线分类的模糊模式重排方法,用于实际收集的脉冲信号集,并取得了较好的分类效果。国内的学者在聚类分选方法上也作了不少研究,许丹探讨了在单站无源定位条件下,当测角精度不高时的信号分选问题,提出一种二次聚类方法;张万军使用 K - Means 聚类对参数相近、相互交叠的非常规雷达信号的交错脉冲流进行分选;祝正威研究了具有脉内调制特征的多部相控阵雷达信号交错脉冲流的聚类分选;国强研究了基于 SVC&K - Means 的聚类分选方法与基于“类型熵”的识别技术相结合的多参数聚类分选器,与传统信号分选体制相比,SVC 聚类分选方法突破了传统分选中对设定容差的限制,能够根据数据集分布特征形成更复杂、更紧的聚类边界,并具有良好的泛化和推广能力。

1.6 基于神经网络和人工智能技术的信号分选

在高密度信号环境下,由于传统的信号分选算法对处于边界的脉冲信号不能很好地归类,或者与多种类别相吻合而造成模糊或错判,James 等人在 TI 公司的支持下完成了利用人工神经网络进行信号分类的研究。他提出了一种自适应网络传感器处理机(ANSP)的构想,这种处理机是一种由特征提取、信号去交错、脉冲模式提取、跟踪器和分类器构成的完善的雷达信号分选处理器原型。1994 年,邓楠译文中提出了一种将反向传播多层感知器用于雷达信号分类的人工神经网络模型,这种模型在进行信号去交错的同时能够识别出辐射源的类型。国内一些单位也进行了人工神经网络用于复杂信号分选的研究,但由于识别性能较好的人工神经网络大多需要事先经过大量样本进行多次迭代训练,在未知辐射源环境下很难做到实时处理,因此在实际应用中并不经常采用。人工智能和专家系统也是有希望取得重大改进的研究领域之一。Cussons 等人研究了基于知识的信号去交错、合并和识别处理过程,在他们研究的基础上,英国海军研究中心研制了一种基于知识的辐射源识别处理机,这种处理机能够反演已被证实是错误的假设,并由此建立新的假设。研究表明,实现基于知识的实时信号去交错和归类处理器的可能途径是采用传输式计算机,这种计算机将基于多数据多指令(MIMD)结构。

基于神经网络模型的人工智能系统在模式分类识别方面的应用取得了很多卓越成就,与传统相关技术比较,它具有解决复杂分类问题的能力、具有通过训练或自学的自适应性以及对噪声和不完整数据输入的不敏感性等优点,因此选择神经网络来解决信号分选识别的问题是一个新的研究方向。虽然基于神经网络模型的人工智能系统识别性能较好,但事先需要经过大量样本进行迭代训练,在未知辐射源的情况下很难做到实时处理,限制了它在实际中的使用。

第2章 雷达脉冲参数测试

辐射源(雷达)的最重要的参数,辐射信号的载频的测试,已在《现代电子战导论(中)》第6章中作过详细论述,这里主要描述雷达脉冲相关参数的测试。

2.1 雷达脉冲信号的描述字

2.1.1 雷达脉冲信号描述字 PDW

对前端输出的实时脉冲信号描述字流 $\{\text{PDW}_i\}_{i=0}^{\infty}$ 进行信号分选、参数估计、辐射源识别,并将对各辐射源检测、测量和识别的结果提供给侦察系统中的显示、存储、记录和其他有关设备。

雷达侦察系统前端输出的 $\{\text{PDW}_i\}_{i=0}^{\infty}$ 的具体内容和数据格式取决于侦察系统前端的组成和性能。在典型的侦察系统中

$$\{\text{PDW}_i = (\theta_{\text{AOA}_i}, f_{\text{RF}_i}, t_{\text{TOA}_i}, \tau_{\text{PW}_i}, A_{P_i}, F_i)\}_{i=0}^{\infty} \quad (2.1)$$

式中 θ_{AOA} ——脉冲的到达方位角;

f_{RF} ——脉冲的载波频率;

t_{TOA} ——脉冲前沿的到达时间;

τ_{PW} ——脉冲宽度;

A_P ——脉冲幅度或脉冲功率;

F ——脉内调制特征;

i ——按照时间顺序检测到的射频脉冲的序号。

2.1.2 可测量和估计的辐射源参数、参数范围和估计精度

雷达侦察系统可测量和估计的辐射源参数包括由分选后的脉冲描述字 PDW 中直接统计测量和估计的辐射源参数,对 PDW 序列进行各种相关处理后统计测量和估计的辐射源参数。这些参数的种类、范围和精度是与雷达侦察系统的任务、用途密切相关的。典型雷达侦察系统可测量和估计的辐射源参数、参数范围和估计精度如表 2.1 所示。

表 2.1 典型雷达侦察系统可测量和估计的辐射源参数、参数范围和估计精度

参数名称	计量单位	参数范围	估计精度	参数来源
辐射源方位	(°)	0 ~ 360	3	由分选后 PDW 统计估值
信号载频	MHz	500 ~ 40 000	3	由分选后 PDW 统计估值
脉冲宽度	μs	0.05 ~ 500	5×10^{-2}	由分选后 PDW 统计估值
脉冲重复周期	ms	0.01 ~ 100	1×10^{-4}	由分选后 PDW 相关统计

表 2.1(续)

参数名称	计量单位	参数范围	估计精度	参数来源
天线扫描周期	s	0.005 ~ 60	1×10^{-3}	由分选后 PDW 相关统计
脉内频率调制	参见频率调制类			由脉内信号分析电路检测
脉间频率调制	估计跳频范围、频点和频率转移概率矩阵			由分选后 PDW 相关统计
脉内相位调制	参见相位调制类			由脉内信号分析电路检测
重复周期调制	估计调制、类型、范围和周期转移概率矩阵			由分选后 PDW 相关统计
脉冲宽度调制	检测脉宽调制、数值和脉宽转移概率矩阵			由分选后 PDW 相关统计
天线扫描调制	检测扫描周期、照射时间、扫描方式等			由分选后 PDW 相关统计

2.2 脉冲参数测试

2.2.1 t_{TOA} 的测量

雷达侦察系统中对 t_{TOA} 的测量原理如图 2.1 所示。其中输入信号 $s_i(t)$ 经包络检波、视频放大后为 $s_v(t)$, 将 $s_v(t)$ 与检测门限 U_T 进行比较, 当 $s_v(t) \geq U_T$ 时, 从时间计数器中读取当前的时间 t 进入锁存器, 产生本次 t_{TOA} 的测量值。实际的时间计数器往往采用 N 位二进制计数器级联, 经时间锁的 t_{TOA} 输出值为

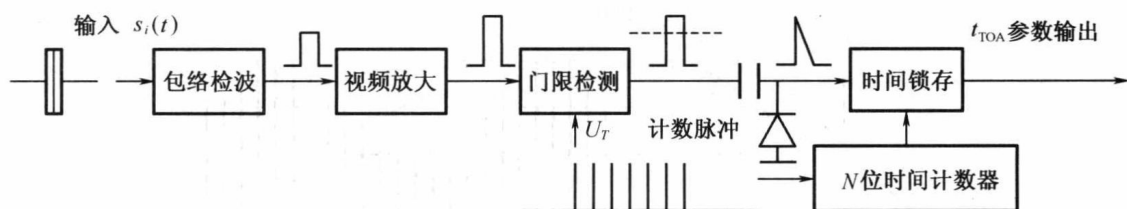
$$t_{\text{TOA}} = D\text{mod}(T, \Delta t, t) \mid s_v(t) \geq U_T \quad s_v(t - \varepsilon) < U_T, \varepsilon \rightarrow 0 \quad (2.2)$$

式中 $D\text{mod}(T, \Delta t, t)$ ——求模、量化函数;

Δt ——时间计数器的计数脉冲周期;

T ——时间计数器的最大无模糊计数范围, $T = \Delta t \cdot 2^N$;

t —— $s_v(t)$ 发生过门限的时间。

图 2.1 t_{TOA} 的测量原理示意图

$$D\text{mod}(T, \Delta t, t) = \text{INT} \left[\frac{t - \text{INT} \left(\frac{t}{T} \right) \cdot T}{\Delta t} \right] \quad (2.3)$$

$\text{INT}(x)$ 为求取实变量 x 的整数值的函数。由于时间计数器的位数有限, 为了防止对长脉冲重复周期的雷达辐射源信号产生周期测量模糊, 一般应保证

$$T > T_{\text{rmax}} \quad (2.4)$$

其中, T_{rmax} 为雷达侦察系统最大无模糊可测的雷达脉冲重复周期。 Δt 取决于 t_{TOA} 测量

的量化误差和时间分辨率,减小 Δt 可降低量化误差,提高时间分辨率,但对于相同的 T ,减小 Δt 意味着提高计数器级数 N ,加大 t_{TOA} 测量的字长,增加信号处理时数据存储和计算的负担。

$s_v(t)$ 信号脉冲前沿的陡峭程度也将影响 t_{TOA} 测量的准确性,而脉冲前沿既取决于输入信号 $s_i(t)$ 本身,也取决于侦察接收机的信道带宽 B_v 。通常在脉冲时域参数测量电路中,按照侦察系统的最小可检测脉宽来设置

$$B_v \approx \frac{1}{\tau_{\text{PW}_{\min}}} \quad (2.5)$$

t_{TOA} 的检测和测量还将受到系统中噪声的影响,特别是在脉冲前沿较平缓、信噪比较低时,系统噪声不仅影响侦察系统的检测概率和虚警概率,还将引起门限检测时间 t 的随机抖动 δ_i ,如图 2.2 所示。 δ_i 的均方根值为

$$\sigma_{\delta_i} = \frac{t_{rs}}{\sqrt{2 \frac{S}{N}}} \quad (2.6)$$

式中 t_{rs} ——检测脉冲的前沿时间;
 S/N —— $s_v(t)$ 的信噪比。

由于大部分侦察系统接收的是雷达天线主瓣辐射的信号,能量比较强,所以适当地提高检测门限 U_T ,保证大信噪比工作,不仅可以降低检测的虚警概率 P_{fa} ,也有利于提高 t_{TOA} 测量的准确性。

如果在输入信号中同时存在两个信号 $s_{i1}(t)$, $s_{i2}(t)$,则由于信号的交调,将使合成信号的包络呈现较复杂的起伏

$$|s_i(t)| = \{ |s_{i1}|^2 + |s_{i2}|^2 + 2|s_{i2}| \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \varphi_1 - \varphi_2] \}^{1/2} \quad (2.7)$$

其中, $|s_{i1}|$, $|s_{i2}|$, ω_1 , ω_2 , φ_1 , φ_2 分别为 $s_{i1}(t)$, $s_{i2}(t)$ 的振幅、角频率和初相位,如图 2.3 所示。其中,当 $|s_{i1}|$, $|s_{i2}|$ 均大于 U_T 时, t_{TOA} 测量可能出现以下两种情况。

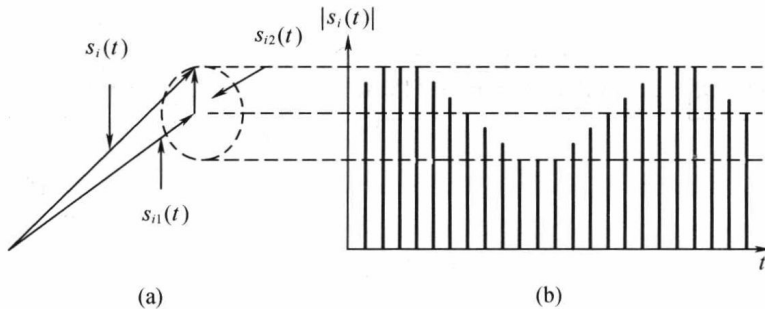


图 2.3 $s_i(t)$ 中同时存在两个信号时的包络示意图

(a) 合成矢量; (b) 合成波形

$$\textcircled{1} \omega_1 - \omega_2 \geq 2\pi B_v \text{ 或 } ||s_{i1}| - |s_{i2}|| \geq U_T$$

两个脉冲信号只产生一次门限检测, t_{TOA} 为先期到达信号的前沿时间,后到的脉冲由于其前沿被先到的脉冲重合而不产生门限检测,且由于两信号频差较大,交调引起的幅度起

伏快于电路响应,或者交调后的最低幅度仍高于有限,因此不会造成脉内的检测中断,即有

$$t_{\text{TOA}} = \min \{ D\text{mod}(T, \Delta t, t_1), D\text{mod}(T, \Delta t, t_2) \} \quad (2.8)$$

$$\textcircled{2} \omega_1 - \omega_2 < 2\pi B_v \text{ 且 } ||s_{i1}| - |s_{i2}|| < U_T$$

两个脉冲信号交调的结果可能造成多次门限检测和 t_{TOA} 测量输出。这是由于交调后最低幅度低于门限,且两信号频差较小,交调引起幅度的时间能够被电路响应的缘故。各次 t_{TOA} 测量值在交调时间内随机分布。

为了克服信号时域重合对 t_{TOA} 检测和测量的不良影响,在雷达侦察系统中应尽量将 t_{TOA} 检测与测量电路设置在方位、频率的滤波处理之后,以便充分利用雷达侦察机在方位、频率上的硬件信号分选和同时测量能力,降低 $s_i(t)$ 在时域参数测量的信号重合概率。

2.2.2 τ_{PW} (PW) 的测量

在雷达侦察系统中, τ_{PW} 的测量与 t_{TOA} 的测量同时进行,如图 2.4 所示。门限检测启动前,脉宽计数器的初值为零,由 t_{TOA} 的门限检测信号 $\textcircled{1}$ 启动脉宽计数器对时钟 $\textcircled{2}$ 计数,当 $s_v(t)$ 低于门限 U_T 时,信号 $\textcircled{1}$ 使计数器停止计数, $\textcircled{1}$ 的后沿使读出脉冲触发器产生锁存信号 $\textcircled{3}$,将脉宽计数值存入 τ_{PW} 参数锁存器, $\textcircled{3}$ 的后沿微分信号 $\textcircled{4}$ 使脉宽计数器重新清零,以便进行下一脉冲的脉宽测量, τ_{PW} 值由 τ_{PW} 参数锁存器输出。设 $s_v(t)$ 从高于门限 U_T 到低于门限 U_T 的时间为 t_{TOE} , 则

$$t_{\text{TOE}} = D\text{mod}(T, \Delta t, t) | s_v(t) < U_T$$

$$s_v(t - \varepsilon) \geq U_T, \varepsilon \rightarrow 0 \quad (2.9)$$

则 τ_{PW} 是以 Δt 为单位,对 t_{TOA} 至 t_{TOE} 之间时间的量化,即

$$\tau_{\text{PW}} = \text{INT} \left(\frac{t_{\text{TOE}} - t_{\text{TOA}}}{\Delta t} \right) \quad (2.10)$$

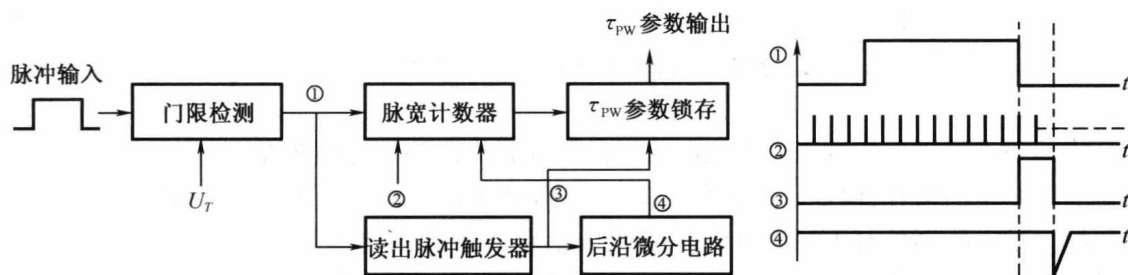


图 2.4 τ_{PW} 的测量原理示意图

当脉宽计数器采用 N 位二进制计数器级联时,其最大无模糊的脉宽测量范围 $\tau_{\text{PW}_{\text{max}}}$ 为

$$\tau_{\text{PW}_{\text{max}}} = \Delta t \cdot 2^N \quad (2.11)$$

t_{TOA} 测量与 τ_{PW} 测量可以采用不同的时间量化单位 Δt ,通常 τ_{PW} 测量的时钟频率较高,以获得较高的脉宽测量精度。同 t_{TOA} 的检测和测量一样, τ_{PW} 的测量也会受到系统中噪声的影响,其测量误差 $\delta\tau_{\text{PW}}$ 的均方根值为

$$\sigma_{\delta\tau_{\text{PW}}} = \frac{t_{rs} + t_{do}}{\sqrt{2} \frac{S}{N}} \quad (2.12)$$