

现代雷达辐射源信号 分选与识别

何明浩 韩 俊 等 著

51



科学出版社

现代雷达辐射源信号分选与识别

何明浩 韩 俊 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

对雷达辐射源信号进行分选与识别是雷达对抗侦察系统中的一个重要环节,近年来,各种新理论、新技术不断涌现。本书系统介绍了作者近些年围绕该领域所取得的相关研究成果。全书共分7章,内容包括:绪论、基于PRI的雷达辐射源信号分选、雷达辐射源信号脉内特征参数提取、雷达辐射源信号脉内特征参数评估与选择、SVM分类器评估与选择、雷达辐射源识别系统效果评估、雷达辐射源工作模式识别。

本书可供从事雷达与电子对抗领域的研究人员参考,也可作为高等院校相关专业高年级本科生和研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代雷达辐射源信号分选与识别/何明浩等著. —北京:科学出版社, 2016.5

ISBN 978-7-03-048269-3

I. ①现… II. ①何… III. ①雷达信号—辐射源—信号分选
②雷达信号—辐射源—信号识别 IV. ①TN957.51

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第100704号

责任编辑:王 哲 邢宝钦 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

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>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年5月第 一 版 开本:720×1 000 1/16

2016年5月第一次印刷 印张:10 3/4

字数:201 000

定价:60.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

信息化条件下的现代战争离不开及时、准确、可靠的雷达对抗情报，其对战争的进程和结局具有决定性的作用。雷达对抗侦察是获取雷达对抗情报的主要手段，其核心技术之一是对雷达辐射源信号进行准确的分选与识别，从截获的密集雷达脉冲流中分选出属于不同雷达辐射源的脉冲，并识别该雷达的型号、体制、用途以及工作状态等。雷达辐射源信号分选与识别结果直接影响到雷达对抗情报的质量，近年来得到该领域研究人员的高度重视，特别是在雷达信号分选、脉内特征参数提取与评估以及雷达工作属性识别等方面，展开了广泛而深入的研究，形成了一系列的理论和技術成果。

多年来，我们持续跟踪研究雷达对抗领域的新思想、新理论、新技术，在 2010 年出版的《雷达对抗信息处理》一书里，围绕雷达辐射源信号的分选与识别技术进行过初步的探讨与研究。为了更加深入、系统、全面地反映我们近年来在这一领域的研究成果和实践体会，在《雷达对抗信息处理》的基础上，着重聚焦雷达辐射源信号的分选与识别相关技术，著成本书。全书共分 7 章。第 1 章论述了现代雷达辐射源信号分选与识别技术的现状和发展趋势；第 2 章分析了基于脉冲重复间隔分选的一系列方法及其优缺点；第 3 章针对传统脉内特征参数在分选与识别中存在的缺陷，研究了 3 种新颖的脉内特征参数提取方法；第 4 章围绕如何科学评估特征参数的性能，在不同的应用需求下选择出性能最优的特征参数，研究了基于多指标的脉内特征参数评估与选择方法；第 5 章聚焦 SVM 分类器的评估与选择问题，分析研究了核函数综合评估、模型参数优化等方法；第 6 章从识别率测试结果定义、评估指标的构建与计算等方面，系统研究了雷达辐射源识别系统效果评估；第 7 章针对雷达辐射源工作模式识别问题，着重分析了重频、脉幅以及数据率在其中的相关应用方法。

在本书的编写过程中，我们特别注重系统性、前沿性和针对性。就系统性而言，既对分选与识别中的一些基础方法进行了论述，又研究了一些诸如脉内特征参数提取、工作属性识别等核心问题，从而较为全面地涵盖了分选与识别领域的主要技术；就前沿性而言，着力分析了当前热门的特征参数评估、分类器评估以及识别结果评估等新技术、新理论；就针对性而言，在相关理论的公式推导上力求准确、严密，但也删舍了一些十分复杂的推导过程，重点突出原理和方法的介绍。此外，为了便于读者学习和对相关技术的拓展研究，在每章都罗列了部分具有代表意义的文献。相信本书对从事雷达与电子对抗领域的科研工作者及高等院校师生会有所帮助。

本书由何明浩教授主持撰写，韩俊博士、陈昌孝博士和郁春来博士参与完成。从事该方向工作的团队成员及研究生在有关研究成果的创新实践和成书过程中付出了辛勤劳动，特别是徐璟博士、刘飞博士、冯明月博士、蒋莹博士以及王欢硕士、杨朝硕

士等，为本书的顺利出版做出了积极贡献。在编写过程中，得到了军内外许多专家、学者的大力支持，并对本书给予了充分肯定，在此一并表示感谢。

随着战场电磁环境的日益复杂和武器装备的发展更新，雷达辐射源信号形式将更加复杂多变，对其进行准确的分选与识别将变得更加困难。我们将继续聚焦这一重要研究领域，在今后的工作中深化相关研究，从理论和技术上力求有新的突破。由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2016年4月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 现代雷达辐射源特点	1
1.1.1 技术特点	1
1.1.2 信号特征及变化样式	4
1.2 分选与识别面临的挑战	11
1.2.1 信号幅度变化不规律	11
1.2.2 工作频带宽变化多样	12
1.2.3 信号参数多变、快变	13
1.2.4 信号波形变化复杂	14
1.2.5 信号特征日益隐蔽	15
1.3 分选与识别的现状与趋势	16
1.3.1 脉内特征参数	16
1.3.2 分类器	23
1.4 主要内容与章节安排	25
参考文献	26
第 2 章 基于 PRI 的雷达辐射源信号分选	32
2.1 直方图分选方法	32
2.1.1 统计直方图分选	32
2.1.2 累积差直方图分选	33
2.1.3 序列差直方图分选	35
2.2 平面变换技术	37
2.3 PRI 变换算法	41
2.3.1 PRI 变换的原理	42
2.3.2 PRI 变换的检测门限	44
2.3.3 运算量分析	45
2.4 基于 SDIF 和 PRI 变换结合的方法	45
2.5 PRI 分选的缺点	47
2.6 本章小结	48
参考文献	48

第3章 雷达辐射源信号脉内特征参数提取	50
3.1 常用脉内特征参数提取方法	50
3.1.1 瞬时自相关算法	50
3.1.2 傅里叶变换法	50
3.1.3 短时傅里叶变换	51
3.1.4 Wigner-Ville 分布	51
3.1.5 小波变换法	51
3.2 频域复杂度特征	52
3.2.1 提取原理	52
3.2.2 实验与分析	55
3.3 时频域模糊函数特征	57
3.3.1 提取原理	58
3.3.2 实验与分析	61
3.4 变换域双谱特征	63
3.4.1 提取原理	63
3.4.2 实验与分析	66
3.5 本章小结	68
参考文献	69
第4章 雷达辐射源信号脉内特征参数评估与选择	70
4.1 常用评估方法	70
4.1.1 基于满意特征选择法	70
4.1.2 基于粗集理论的特征选择法	70
4.1.3 基于主成分分析的特征选择法	71
4.2 基于多指标的特征参数评估方法	71
4.2.1 评估指标的构建	71
4.2.2 评估指标的计算	73
4.2.3 评估指标的规范化	78
4.2.4 评估实验与分析	79
4.3 基于分级多指标的评估方法	81
4.3.1 分级评估模型构建	81
4.3.2 信噪比评估方法	83
4.3.3 指标权重的确定	84
4.3.4 评估实验与分析	85
4.4 本章小结	88
参考文献	89

第 5 章	SVM 分类器评估与选择	90
5.1	核函数及其对 SVM 的影响	90
5.1.1	核理论	90
5.1.2	核函数	92
5.1.3	实验与分析	93
5.2	基于多指标的核函数综合评估与选择方法	96
5.2.1	评估指标及模型的建立	96
5.2.2	评估指标计算方法	97
5.2.3	实验与分析	101
5.3	基于智能优化算法的 SVM 模型参数寻优方法	104
5.3.1	优化问题及智能优化算法	104
5.3.2	基于智能优化算法的 SVM 模型参数优化方法	107
5.3.3	实验与分析	108
5.4	基于多指标的 SVM 算法性能评估	112
5.4.1	评估指标及其计算方法	112
5.4.2	实验与分析	114
5.5	本章小结	116
	参考文献	116
第 6 章	雷达辐射源识别系统效果评估	118
6.1	识别率测试结果	118
6.1.1	识别率的含义及性质	118
6.1.2	MRR 呈正态分布的证明	119
6.1.3	MRR 样本的生成	121
6.2	评估指标的构建	122
6.2.1	评估指标构建原则	122
6.2.2	评估指标的选取	123
6.2.3	评估指标的层次结构	124
6.3	评估指标的计算	125
6.3.1	MRR 均值的计算	125
6.3.2	MRR 方差的计算	126
6.3.3	MRR 分布指标的计算	126
6.3.4	MRR 独立性指标的计算	128
6.3.5	实验与分析	129
6.4	基于模糊综合评判的评估方法	132
6.4.1	模糊理论及模糊综合评判法	132

6.4.2 实验与分析	134
6.5 本章小结	135
参考文献	135
第7章 雷达辐射源工作模式识别	137
7.1 现代雷达典型工作模式分析	137
7.1.1 搜索模式	137
7.1.2 跟踪模式	138
7.1.3 武器控制模式	138
7.1.4 综合工作模式	139
7.2 基于重频的工作模式识别	140
7.2.1 雷达重频模式分析	140
7.2.2 提取原理	142
7.2.3 实验与分析	145
7.3 基于脉幅的工作模式识别	146
7.3.1 雷达扫描方式分析	146
7.3.2 提取原理	148
7.3.3 实验与分析	153
7.4 基于数据率的工作模式识别	156
7.4.1 相控阵雷达数据率与工作模式关系	156
7.4.2 基于数据率的相控阵雷达工作模式识别方法	159
7.5 本章小结	160
参考文献	160

第1章 绪 论

对雷达辐射源信号进行分选与识别是雷达对抗侦察系统中的关键技术之一，也是雷达对抗信息处理中的重要内容，其水平是衡量雷达对抗侦察系统和信息处理技术先进程度的重要标志。所谓分选就是从密集交叠的信号脉冲流中分离出各部雷达的信号并选出有用的信号，而识别则是将分选后的信号的特征参数与先验知识数据库进行比较匹配，以确认该辐射源及其工作模式与平台。分选是识别的前提和基础，只有从高密度的随机交叠的信号流中成功分选出各部雷达的脉冲信号后，才能对信号的参数进行测量和分析，并完成识别。对雷达辐射源信号进行分选与识别是雷达对抗侦察系统信号处理的目的，也是电子情报侦察、电子支援措施和威胁告警的主要组成部分。

雷达辐射源信号的分选与识别问题从数学角度上分析就是一个模式分类与识别的问题，为了对模式进行分类与识别，首先需要从雷达信号中获得一些要素作为模式分类与识别的特征。当前对雷达辐射源信号分选与识别的特征主要依赖于到达角、载频、重频、脉宽以及脉幅等常规参数，由于现代雷达的常规参数具有多变、快变等特点，仅利用常规参数难以达到理想的分选识别准确率，尤其是以相控阵为代表的新型体制雷达，无论技术参数上还是战术运用上，与常规雷达相比，都有着质的飞跃。要实现对现代雷达辐射源信号的准确分选与识别，需要深入分析研究信号脉内有意和无意调制特征的变化规律、脉间特征参数的取值规律，研究有针对性的分选识别算法，以提高最终的分选识别准确率。此外，当前战场电磁环境异常复杂，应用需求多样化、复杂化，在不同的应用背景下选择最适合的特征参数和分类器显得至关重要，这就需要构建科学完备的评估模型，一方面对当前可用于分选识别的特征参数和分类器进行性能评估，另一方面对分选识别结果的满意度进行评估，通过后者指导特征参数和分类器的选择与设置，进而得到不同应用需求下的最优结果，使雷达辐射源信号的分选识别过程形成闭环。

本书围绕现代雷达辐射源信号的分选与识别工作，着重阐述雷达信号脉内和脉间特征参数的提取与评估、分类器的评估与选择、雷达辐射源识别效果评估以及雷达辐射源工作模式识别等技术。

1.1 现代雷达辐射源特点

1.1.1 技术特点

现代新体制雷达，尤其以相控阵雷达为代表，所采用的技术先进，预警探测能力强，主要特点可归纳如下。

1. 采用有源相控阵技术

雷达功率孔径积大, 易获得较大输出功率(同样的发射机功率和天线孔径, 输出功率可增大 3~4 倍), 探测能力强。与无源相控阵天线相比, 具有以下特点: ①发射馈线损耗降低; ②馈线系统对功率要求降低, 改善发射天线的体积、质量指标; ③简化复杂的馈线系统设计; ④更好的可靠性和更快的系统响应时间; ⑤提高相控阵雷达数字化程度。典型的如外军某型弹道导弹预警雷达, 每个阵面有两千多个辐射单元(其中有源单元占据一半以上), 每个单元的固态发射机可输出功率为 350W, 其总功率可达到近 600kW, 对导弹的搜索距离可达到 4800km。且有源天线阵的电扫描可在方位和仰角上控制, 每个组件都有自己的发射和接收天线, 特别是采用二维有源相控阵体制的雷达, 具备搜索、跟踪和武器控制的多功能、多任务能力。例如, 美国海军“宙斯盾”系统中已大量生产、装备的二维相扫相控阵雷达 AN/SPY-1 的改进型、F-22 战斗机机载火控雷达 AN/APG-77 等也采用有源相控阵天线。

2. 采用数字化技术

相控阵雷达普遍采用直接数字频率综合器、数字上变频器、数字下变频器和数字控制振荡器等实现波束的数字形成, 具有较高的数字化程度。采用直接频率综合器产生雷达发射信号波形和实现天线波束相控扫描所需的单元之间的移相值, 给雷达信号波形产生与波束指向控制带来更大的灵活性与自适应能力, 具有快速的广域扫描速率、数字多波束、高灵敏度和更好的杂波对消、操作灵活(多路同时波束, 波束多路传输)、更好的标校方式等优势, 这也是其实现多功能的技术保障。数字波束形成技术的一个主要应用, 是形成多个单脉冲测角波束。在常规抛物面天线或相控阵列接收天线中, 为进行单脉冲测角, 需要形成单脉冲接收波束。若采用数字方法实现单脉冲测角多波束, 则可在计算机内用软件替代单脉冲比较器等硬件网络, 也不需要单独的和差波束接收通道。

3. 具有多目标跟踪、多功能及自适应工作模式

多功能相控阵雷达具有根据观测任务、目标情况(目标 RCS 大小、目标威胁度、目标距离等)而自适应地改变本身的工作模式、工作参数、信号波形和信号能量分配的能力。例如, 用于“爱国者”导弹防御系统中的相控阵雷达 AN/MPQ-53, 可同时对付近百批敌方飞机并制导多枚己方的地空导弹; 用于“宙斯盾”系统的相控阵雷达 AN/SPY-1, 可同时处理数百个目标, 具有给军舰提供连续搜索和跟踪的能力。这些多功能相控阵雷达, 可在对全空域扫描以发现新目标的同时, 对多批目标进行跟踪, 并对多批目标进行武器控制, 可完成多部机械扫描雷达难以完成的任务, 这对于提高整个系统的响应速度是十分有利的。

4. 采用宽带/超宽带技术

宽带相控阵雷达技术是当前相控阵雷达发展的一个重要方向, 这主要与相控阵雷

达在多目标、多功能情况下要完成的许多新任务密切相关。宽带相控阵雷达技术主要用于高分辨相控阵雷达系统。采用宽带信号是机载、空间载宽带相控阵雷达实现雷达遥感、检测地面或海面静止与运动目标的重要手段,也是地基或海基宽带相控阵雷达对空中或空间飞行目标进行逆合成孔径成像的前提条件,同时是解决多目标分辨、目标分类和识别、目标属性判别等难题的重要途径。此外,为了提高相控阵雷达的抗干扰能力,实现低截获概率,也需要采用宽带雷达信号。宽带或超宽带相控阵雷达还可兼作电子支援措施(Electronic Support Measurement, ESM)通信等用途,使相控阵雷达天线成为共享孔径的天线系统。雷达的工作带宽达到10%以上,有些雷达的带宽达到了20%~30%,个别雷达甚至达到50%。典型地,S波段雷达的工作带宽达400~500MHz,X波段雷达的工作带宽达1~2GHz,增强了频率反侦察、反干扰的能力。

5. 采用低截获概率设计技术

雷达信号波形复杂、多变,占空比增大,并可根据目标探测需要进行控制,随机改变发射功率、工作频率、信号波形和参数等,使得敌方难以截获和识别。其主要实现途径有:一是雷达发射的脉冲随机变化,使侦察系统和反辐射武器难以捕捉和跟踪一个“恒定”的信号;二是对雷达实施热屏蔽,降低雷达的红外特征;三是降低雷达旁瓣,减小波束宽度,使电子侦察系统和反辐射导弹难以截获雷达辐射信号,有效降低其攻击精度;四是发射功率控制,如隐身飞机雷达,不会轻易发射探测信号,且同时严格控制其发射功率,发射满足目标探测所需的最低功率。低截获概率雷达的发展需要既要提高侦察接收机灵敏度,又要适应复杂电磁信号环境的要求。

6. 发射方式控制灵活

相控阵雷达可根据威胁环境采用有源或无源工作模式。两种模式可按扇区控制,在确保探测能力的同时提高雷达的生存能力。无源模式时关闭发射机,只接收信号,对干扰源进行分析、定位,以便采取相应的反干扰对策。

7. 采用超低副瓣和副瓣处理技术

天线副瓣电平是反映雷达系统反对抗能力的一项重要指标,现代雷达的平均副瓣一般在-50dB以上。在相控阵雷达系统设计中,一般采用幅度加权、密度加权、相位加权以及它们的混合加权方法作为天线照射函数的加权方案降低副瓣电平。

8. 雷达与通信、光电、电子对抗等综合一体化和多传感器信息融合

因为相控阵雷达天线易于做到宽频带,这使其在完成雷达功能外,还可兼有实施电子对抗侦察、电子干扰和数据链等功能,为雷达与通信、电子对抗等综合一体化提供基础,并有利于提高雷达的反对抗能力。例如,F/A-22上的AN/APG-77雷达,可以综合用于电子战、通信等方面。

9. 可靠性、维护性好

有源相控阵雷达采用分布式的多个固态T/R组件代替了易出故障的大功率行波管

发射机和机械扫描部件,而且天线是由多个阵元构成的,即使其中的 5%发生故障,雷达还能有效工作,因而抗故障能力强,可靠性和维护性好。

现代新体制雷达普遍采用了以上技术,从而使一套系统可以完成由多部搜索、跟踪和武器控制雷达才能实现的功能,利用时间和能量管理使每次任务功能都可以在很短的间隔内完成。这些技术的综合运用给电子对抗侦察系统带来了前所未有的挑战。

1.1.2 信号特征及变化样式

1. 频域特征

载频是雷达参数中最为重要的参数之一,它与雷达的技术体制、战术用途有着密切的关联。对于担负搜索任务为主的雷达,由于监视空域大、作用距离较远、目标数量较多,一般采用较低的工作频率,目前多数空间目标监视雷达,其作用距离达到几千千米,多采用 P 波段和 L 波段,以便充分利用加大天线口径的办法来提高雷达探测距离,典型的如地面预警雷达“铺路爪”系列、地面远程搜索雷达 AN/FPS-117;对于需要完成跟踪任务的雷达,如担负火控、制导任务的雷达,则选用较短的波长,提高发射天线增益,来增大跟踪距离,提高跟踪精度,如 F-18 战斗机机载雷达 AN/APG-79、F-22 战斗机机载雷达 AN/APG-77、“爱国者”地空导弹系统雷达 AN/MPQ-53 等。

现代雷达的工作带宽达到了 10%~30%,雷达发射信号的频率在工作带宽内以各种方式灵活变化,为了实现抗干扰、解模糊等各种目的,会采用不同的频率变换方式,典型的有脉间伪随机捷变频、脉组伪随机捷变频、脉间和脉组自适应捷变频、频率分集等。以外军某型机载火控雷达为例,其频率工作范围内有多个频点可供伪随机选择,一般有以下几种变化样式:①伪随机捷变频,即伪随机地选择信号发射频率,可进行脉组或脉间的频率捷变;②预编程变频,即人为地设置频率变化方式,如在每个扇区内进行编程控制;③随机捷变频,即频率随机变化;④自适应捷变频,即根据干扰分析结果,自动选择干扰功率最弱的频率,通常是选择前一个驻留中受干扰最小的频率。

2. 时域特征

在设计雷达信号的脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)与脉冲宽度(Pulse Width, PW)值时,首先需考虑到发射机所能输出的最高平均功率。在保证发射机工作稳定的条件下,根据雷达不同的工作模式来选择 PRF 和 PW。PRF 是雷达辐射源信号的一个十分重要的参数,决定了雷达的最大不模糊探测距离与测速分辨力。在各种特征参数中,PRF 是雷达信号参数中变化范围较广、工作样式较多的一个参数,其调制样式与辐射源的工作模式也具有重要联系。PRF 的基本调制类型主要有:PRF 固定、PRF 参差、PRF 滑变、PRF 正弦调制以及 PRF 抖动等。

PRF 固定是指 PRF 的最大变化量小于平均值的 1%。这种变化样式一般用于常规体制雷达, 目前在实际应用中较少采用。

PRF 参差主要包括脉间参差与脉组参差。脉间参差是指雷达顺序、重复地采用了两个或两个以上的脉冲重复周期, 通常由长短交替的 PRF 组成, 常见的有三参差、四参差、五参差等。脉组参差是指雷达在某一 PRF 值上发射几个脉冲, 然后跳到另一 PRF 值上发送几个脉冲, 并具有周期性。PRF 参差可用于消除动目标显示 (Moving Target Indicate, MTI) 系统中的盲速。

PRF 滑变是指 PRF 单调地增加或者减少, 达到一个最大或最小值以后再返回。该变化样式可以在保证最大作用距离的同时消除盲距, 且可以使某一高度范围内的仰角扫描达到最佳性能。PRF 滑变用于固定高度覆盖扫描来优化俯仰扫描, 以及消除盲距。

PRF 正弦调制是指 PRF 在一定范围内受正弦函数调制, 通常在圆锥扫描雷达中用于制导, 也可以避免目标遮蔽或测距。

PRF 抖动是指雷达信号的 PRF 值在某一中心值附近随机地抖动, 其变化范围一般为 1%~10%。PRF 抖动可用于防护某些通过预测脉冲到达时间进行干扰的技术。

在相控阵雷达中, PRF 的变化样式通常为多种变化样式的组合, 如一维相控阵雷达在同一个波位上采用 PRF 参差工作, 在不同波位之间 PRF 又是滑变的。多功能雷达在搜索加跟踪 (Track and Search, TAS) 模式下, PRF 的变化样式为多种样式的组合。

雷达信号的 PW 影响雷达的探测能力和距离分辨力, 其变化形式通常比较简单, 主要有 PW 固定、PW 可选择、PW 抖动等方式, 其取值的变化一般与脉冲重复间隔 (Pulse Repetition Interval, PRI) (PRF 的倒数) 的取值具有一定相关性。PW 固定是指 PW 中心值保持在一个数值附近波动。PW 可选择主要是指相控阵雷达在不同的波位上可以选择不同的 PW, 也可随 PRF 相关变化。PW 参数具有较好的聚敛性, 对于信号分选具有一定参考作用。但由于在复杂电磁环境下, 信号交叠严重, 并且多径效应导致的脉冲包络的严重失真也会使得脉宽测量不够精确, 不同信号的 PW 参数可能会存在交叠的现象。

相控阵雷达在搜索模式下, 按照搜索空域预警的重要性、目标可能出现在该空域的概率、雷达探测威力等, 可将搜索空域分为多个不同的搜索区, 如水平搜索区域、近距离搜索区域等。在不同的区域、不同的工作模式, 选择不同的 PRF 与 PW 值来工作。搜索远距离目标时, 脉冲重复周期较长, 信号的 PW 也较宽; 搜索近距离目标时, 如对高仰角目标进行搜索, 因作用距离较短, 信号 PRI 较短, PW 也较窄。在多目标跟踪模式下, 对不同的跟踪情况也可分配不同的跟踪采样间隔时间和跟踪时间, 信号波形也可按不同的跟踪状态进行改变。为了便于用时间分割方法进行多目标跟踪, 跟踪时间需集中在一起。因此, 各种跟踪状态对应的跟踪间隔时间应是最小跟踪间隔时间的整数倍。同时, 相控阵雷达在搜索过程中发现目标之后, 一方面要对该目标进行跟踪, 另一方面要继续对搜索空域进行搜索, 即 TAS 模式下, 雷达在搜索与不同的跟踪状态下, 信号的 PRI、PW 参数也有相应的变化。

3. 能域特征

信号能量管理在相控阵雷达系统设计中是一项重要内容。雷达探测信号的能量是指信号功率及其持续时间的乘积,因此改变信号能量即改变信号的功率时间乘积。相控阵雷达具有作用距离远、跟踪目标多的性能,考虑到要观测目标的雷达反射截面积(Radar Cross Section, RCS)值变化范围较大,且在空间和时间上分布不均匀等特点,需要合理分配雷达信号能量。在搜索和跟踪状态之间分配信号能量就是要根据不同的目标状况,如目标数目多少、目标空间分布的远近、目标 RCS 的大小、目标的重要性与威胁度、目标是否有先验知识及对目标测量精度的不同要求等,来合理选择信号能量的分配系数。能量管理的调节措施主要有:调节波束驻留数目、调节雷达重复周期、调节脉冲宽度、调节搜索或跟踪间隔时间、改变搜索空域、采用集能工作模式(主要通过通过对重点方向、区域增加波束驻留数目)等。无论搜索工作模式还是跟踪工作模式,改变波束驻留数目常作为雷达信号的能量管理方式。以上调节措施的一个前提是维持发射机平均功率不变,即充分利用发射信号的平均功率。有的情况可以在降低发射机辐射功率时进行工作,这时可采用降低信号工作比、控制工作发射机的数量等作为信号能量管理的控制措施。

4. 数据率特征

数据率是能够反映新体制相控阵雷达辐射源工作模式的特征参数。数据率既是一个战术指标,又是一个技术指标,通常将其定义为对同一目标相邻两次照射的时间间隔的倒数,以“次/秒”为单位。对于机械扫描雷达,数据率由扫描周期决定;一维相控阵雷达数据率由方位扫描周期和俯仰扫描方式决定;二维相控阵雷达波束扫描灵活,数据率随工作模式、目标的距离、数量等变化。若采用数据率的倒数,则数据采样间隔时间这一概念可以解释雷达获取数据的过程及物理意义。相控阵雷达具有两种最基本的工作模式:搜索模式与跟踪模式,相应地对于数据率的要求也并不相同。

搜索状态下,数据率是指相邻两次搜索完指定空域的时间间隔的倒数。对远程特别是超远程相控阵雷达,重复周期长,导致搜索时间长,搜索间隔时间也相应增加,从而搜索数据率降低。为了确保数据率满足要求,对重点搜索空域分配的数据率要高于一般搜索区,近区搜索空域分配的数据率要高于远区搜索区。如图 1.1 所示,区域 1 为重点搜索区,区域 2 为一般搜索区,分为两部分。对于重点搜索区,通过减小搜索间隔,使 $T_{si1} < T_{si2}$, 来增大搜索数据率。例如,将区域 2a、2b 搜索完一遍之后,区域 1 应搜索完两遍,从而使区域 1 的搜索数据率较区域 2 增大 1 倍。此时,两区域的搜索间隔时间分别为 $T_{si1} = T_{s1} + T_{s2} / 2$, $T_{si2} = T_{s2} + 2T_{s1}$ 。

跟踪状态下,数据率是指对同一目标跟踪采样间隔时间的倒数。波束发现目标以后,转入正常跟踪状态前还有一个过渡过程,由于在搜索检测与确认期间,目标的飞行方向、飞行速度尚不知道,所以此时的数据率较高,一般前 2 次跟踪采样的间隔时间要比正常跟踪情况高 2~5 倍,以实现可靠的跟踪过渡。当转入跟踪状态后,可根据

目标的远、近、重要程度以及威胁等级自适应地改变数据率。在多目标跟踪状态下，对不同的目标采用不同的跟踪信号波形，还可在对远距离目标跟踪的重复周期内，合理安排对近距离目标的跟踪模式对应的数据率信号，实现对多波束信号能量的分配，并满足不同跟踪目标数据率的要求。如图 1.2 所示，通过调节在不同波束位置的信号脉冲宽度的大小、重复周期的长短等，实现对多波束信号能量的分配，并满足不同跟踪目标数据率的要求。

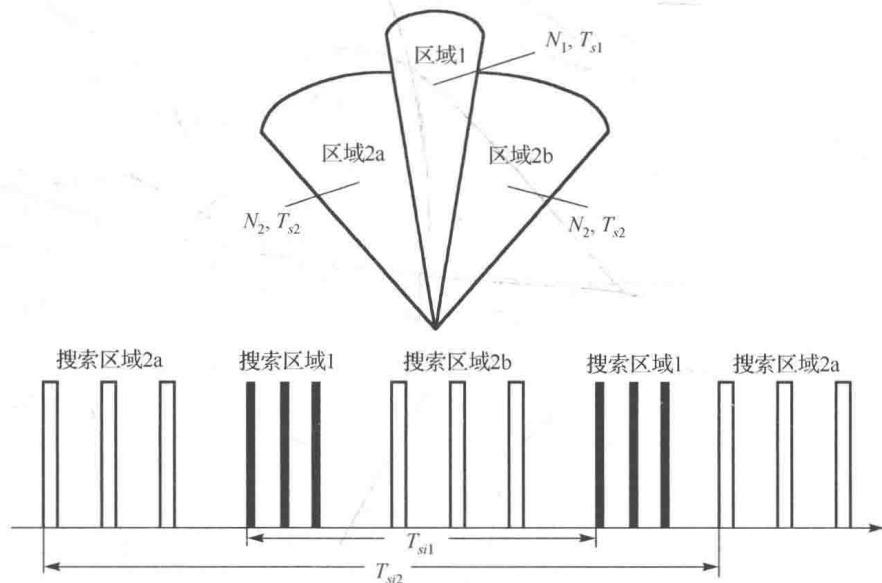


图 1.1 相控阵雷达在不同区域的搜索数据率示意图

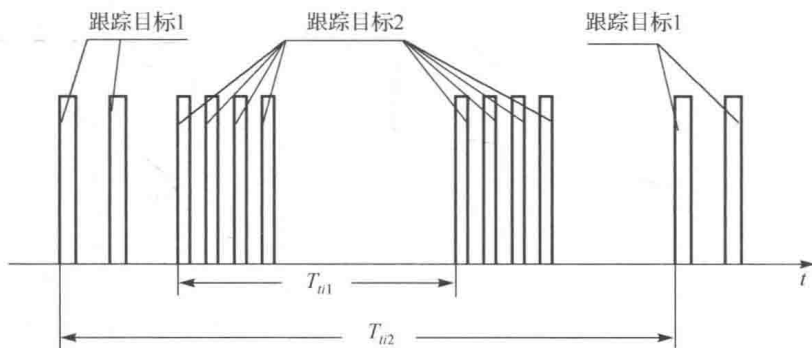


图 1.2 相控阵雷达多目标跟踪模式下跟踪数据率示意图

与传统雷达系统不同，相控阵雷达的 TAS 工作模式可以通过时间分割的方式同时并行地执行多个任务，即对某些目标进行跟踪的同时对其他空域进行搜索，如图 1.3 所示，而这些任务的数据率不同，因此相控阵雷达的数据率就不同于传统雷达为固定常值，而是需要根据实际的应用进行灵活的选取。这样既可保持对目标的跟踪连续性，提高雷达测量精度，又可保证合理调节相控阵雷达在搜索与跟踪之间合理分配信号能

量、合理调节跟踪目标数目，也就是在不同阶段可以根据目标的多少、远近及威胁等级，采用不同的数据率。

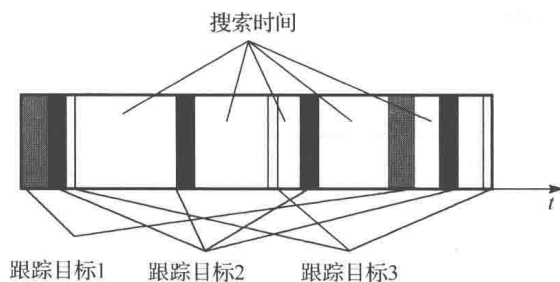


图 1.3 相控阵雷达 TAS 模式下数据率示意图

5. 脉内调制特征

雷达信号的脉内调制特征包括人为的有意调制特征和系统附带的无意调制特征。

有意调制是雷达波形设计者为了实现某种特定的功能，人为地加入了脉冲压缩体制信号上的调制特征，以提供大的时宽带宽 (Band Time, BT) 积，来解决雷达的测距、测速精度与作用距离之间的矛盾。主要的调制方式包括脉内相位调制、频率调制、幅度调制和三种调制组合的混合调制。典型的脉内调制样式有：线性调频、非线性调频、频率编码、相位编码以及混合调制等。

1) 线性调频 (Linear Frequency Modulation, LFM) 信号

信号的数学表示式为

$$s(t) = \begin{cases} A \exp \left[j 2 \pi \left(f_0 t + \frac{1}{2} \mu t^2 \right) \right], & 0 \leq t \leq T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1.1)$$

式中， A 为非负数； μ 为调频斜率。

2) 非线性调频 (Nonlinear Frequency Modulation, NLFM) 信号

非线性调频信号的调制样式较多，可用解析式表示为

$$s(t) = \begin{cases} A \exp [j(2\pi f_0 t + \varphi(t))], & 0 \leq t \leq T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1.2)$$

式中， $\varphi(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + \cdots + a_i t^i (i = 0, 1, 2, \cdots)$ ； A 为非负数。

3) 频率编码 (Frequency Shift Keyed, FSK) 信号

频率编码信号表达式为

$$s(t) = \sum_{i=0}^{N-1} A \text{rect} [t - iT_r, T_r] \exp [j(2\pi f_i t + \varphi)] \quad (1.3)$$

式中， N 为子码数； T_r 为子码宽度； f_i 为频率编码； φ 为初相。