

Modern Radar Signal Processing

现代雷达信号处理

马晓岩等 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



现代雷达信号处理

马晓岩 等编著



国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

雷达信号处理是雷达技术中最具生机和活力的一个领域,借助于自身和相关学科领域一系列新理论、新技术的推动发展十分迅速,在雷达系统中的作用越来越为重要。

本书较全面地梳理了现代雷达信号处理的方法体系、发展脉络和构架系统,内容新颖、理论性和应用性较强,共分7章,内容包括:概论,现代雷达环境与目标特性,现代雷达信号处理新技术,相控阵雷达信号处理,高分辨成像雷达信号处理,无源雷达信号处理和多输入多输出雷达信号处理。

本书可作为高等院校雷达专业本科生、硕士和博士生学习现代雷达信号处理的教材,也可作为广大科研院所和部队从事雷达研究和使用的参考书目。

图书在版编目(CIP)数据

现代雷达信号处理 / 马晓岩等编著. —北京:
国防工业出版社, 2013. 2
ISBN 978 - 7 - 118 - 08651 - 5

I. ①现... II. ①马... III. ①雷达信号处理
IV. ①TN957.51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 023390 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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 20¼ 字数 464 千字
2013 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 76.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

序

雷达自第二次世界大战期间发明以来,时至今日已走过了 80 余年的发展历程,其间雷达体制不断得以丰富,功能也得到了极大扩展。相控阵雷达、高分辨成像雷达、无源雷达以及多输入多输出雷达等新体制雷达相继涌现,复杂波形设计与脉冲压缩、波束控制、干扰抑制、目标成像、特征识别等新功能日益成熟。信号处理作为现代雷达中的分系统之一,担负的作用十分重要,为现代雷达和相关功能的实现提供了有力支撑。雷达信号处理理论和方法的完善与成熟不断推动着现代雷达体制和技术的发展,是雷达领域中最活跃的研究热点。

雷达信号处理作为一门独立的学科始于 20 世纪 50 年代末,其标志是脉冲压缩技术的提出与成功应用。雷达信号处理的基本任务是滤除各种干扰,并从回波信号中检测目标以及估计目标的参数,这也是经典雷达信号处理的主要内容。经典雷达信号处理的对象主要是平稳高斯回波信号,处理的方法主要有基于傅里叶分析的动目标显示(MTI)和动目标检测(MTD)以及基于统计信号处理理论的各种滤波和检测方法。雷达新体制的出现和新功能的诉求,促使雷达信号处理理论和方法不断得到完善和丰富。现代雷达信号处理的对象除了平稳高斯回波信号外,还包括非平稳和非高斯信号,信号处理方法除了包括傅里叶分析和统计信号处理理论外,自适应滤波处理、空时二维处理、阵列信号处理、现代谱估计理论、时频变换、智能与认知信号处理等一大批先进的处理理论和方法已逐渐在现代雷达中得到应用,极大地推动了雷达信号处理学科的发展。

作者在其 20 世纪 90 年代编著的《雷达信号处理》基础上,基于对现代雷达信号处理近 20 年进展和成果的系统总结,编写了这本书。本书内容系统、新颖,不但涵盖了现代雷达目标与环境特性以及信号处理的主要新技术和新方法,而且也对相控阵雷达、高分辨成像雷达、无源雷达以及多输入多输出雷达等新体制雷达的信号处理原理和方法进行了介绍。更为重要的是,这本书较全面梳理了现代雷达信号处理的方法体系和发展脉络,并为不同雷达信号处理问题的解决提供了有所裨益的启迪和指引,还列举了大量仿真结果和具有代表性的参考文献,这十分有助于广大院校、科研院所和部队对现代雷达信号处理知识的学习。本书的出版是雷达技术领域的一项重要成果,是对现有雷达技术丛书体系的有益补充,对我国雷达领域人才培养和装备科研无疑也将具有重要的促进作用。

中国工程院院士
中国电子科技集团公司第三十八研究所所长



2012 年 8 月于合肥

前 言

雷达自 20 世纪 30 年代初发明以来,至今已有 80 余年的发展历程。作为雷达中最具生机和活力的一个领域,雷达信号处理借助于自身和相关学科领域一系列新理论、新技术的推动,已得到飞速发展,并在雷达系统中的作用越来越为重要。为了使广大从事雷达教学和研究人员全面掌握这一领域理论和实现技术方面的基本知识,1998 年,我们结合当时雷达装备以及雷达信号处理发展现状编写了《雷达信号处理》一书,对基于经典统计信号处理理论和傅里叶变换理论的雷达信号处理原理与实现技术进行了较系统的介绍。10 余年来,随着反辐射武器技术、综合电子战干扰技术的日益成熟和完善,尤其是“低、慢、小、高、快、远”目标类型的出现与发展,在对雷达生存环境构成更为严峻挑战的同时,更削弱了雷达的探测能力,这无疑也极大促进了雷达技术的长足发展。雷达所采用的探测方式从有源走向有源/无源并举、从单基地走向单基地与多基地共存,频段不断向微波波段的低端和高端延伸,系统带宽从窄带走向宽带和超宽带,天线也由以传统机械扫描的单孔径天线为主发展为电控的多孔径阵列天线为主。与之相适应的雷达信号处理功能已经从早期杂波对消和目标检测拓展到复杂波形设计与脉冲压缩、波束控制、干扰抑制、目标成像、特征识别等,处理对象既包含传统的平稳高斯信号,同时也包含非平稳和非高斯信号,而处理手段则得益于自适应滤波处理、空时二维处理、阵列信号处理、现代谱估计理论、时频变换、智能与认知信号处理等现代信号处理理论和方法的应用而变得更为丰富。此前作者编著的《雷达信号处理》内容已显陈旧,难以满足院校、科研生产院所和部队对现代雷达信号处理理论和方法学习了解的迫切需求。为此,我们全面总结雷达信号处理方面的新近成果和发展趋势,并结合多年来的科学研究与教学体会,编写了这本导论性著作。

在本书的编写过程中,我们特别注重构架和内容的系统性、新颖性、针对性以及导论性。就系统性而言,本书既对现代雷达探测所涉及背景与目标的相关特性进行论述,又对现代雷达系统脉冲压缩、目标检测、干扰抑制、目标识别技术所涉及的方法进行了讨论,同时还专门对现代雷达中的相控阵、高分辨成像、无源以及多输入多输出等重要体制的信号处理原理进行了介绍,从而较为全面地涵盖了针对现代雷达目标特性、重要功能与体制的信号处理问题。就新颖性而言,本书基于现代雷达探测所面临的主要问题,归纳总结了近年来现代雷达信号处理所涉及环境与目标特性、处理新技术以及新体制雷达信号处理的相关成果。就针对性而言,为适应院校、科研生产院所和部队对现代雷达信号处理不同层次的需求,书中在全面介绍相关雷达功能、体制以及方法原理的同时,对相应信号处理方法也进行了深入浅出的理论分析,并提供了相应仿真方法和测试结果。就导论性而言,本书编写中针对不同内容较为全面地引用和总结了该内容相关研究领域典型处理方法的

原理,书中相关理论推导在力求准确和严密的基础上,对复杂推演过程给予了适当删减,重点突出原理和方法机理的介绍,力求呈现给读者解决不同问题的方法体系以及发展的脉络,以期为读者提供探寻解决问题有所裨益的启迪和指引。同时,为了便于读者学习和对相关方法的深入研究,本书在每章均列举了大量具有代表性的参考文献,以方便读者查阅。

全书分为三个部分:第一部分(第1章)综述了现代雷达信号处理的基本概念、基本内容及发展趋势;第二部分(第2~3章)讨论了现代雷达环境和目标特性,并集中对现代雷达信号处理的主要新方法和新技术作了介绍;第三部分(第4~7章)分别介绍了相控阵雷达体制(包括地基相控阵雷达、预警机相控阵雷达以及天波超视距雷达)、高分辨成像雷达体制(包括合成孔径雷达、逆合成孔径雷达以及干涉合成孔径雷达)、无源雷达体制以及新近发展起来的多输入多输出雷达体制所涉及的信号处理基本原理和方法。

本书第1章由马晓岩编写;第2章2.3节、第3章3.1节、3.2节、3.3节、3.5节以及第7章由王党卫编写;第2章2.1节、2.2节、第3章3.4节以及第5章由杨军编写;第4章由袁俊泉编写;第6章由王党卫和黄晓斌编写。主编马晓岩设计了本书的总体框架和章节内容,并对全书进行了统稿和修改。本书在编写的过程中,全面总结了课题组近10年主持和参与的国家973重大基础理论项目、国家自然科学基金项目、国防基础科研项目、中国博士后特别资助与中国博士后面项目以及空军项目的相关成果,同时也参考和引用了较多现代雷达新技术和新装备相关著作、教材以及论文所阐述的处理原理和方法。对于所有这些项目的资助单位和相应出版物、国际会议以及作者,这里我们一并表示由衷的感谢。特别是,感谢国家自然科学基金(No. 61179015)对本书出版的支持。

由于近年来众多新体制雷达和信号处理方法的不断涌现,本书无意亦无力深入涉及问题的各个方面,仅就现代雷达信号处理的若干新技术和主要新体制雷达中的信号处理理论、方法进行讨论,很难反映现代雷达信号处理的全貌。期望对一些内容进行更深入了解的读者请参阅相关的专门著作和文献。此外,由于编者水平所限,书中难免存在错误和不妥之处,还可能遗漏了一些重要参考文献,敬请读者谅解和批评指正。

编者

2012年7月于武汉

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 基本概念与术语	1
1.1.1 信号与信号处理	2
1.1.2 早期雷达、传统雷达和现代雷达	4
1.1.3 经典雷达信号处理与现代雷达信号处理	7
1.2 雷达信号处理的基本理论和方法	9
1.2.1 雷达信号处理基本理论	9
1.2.2 雷达信号处理基本方法	15
1.3 现代雷达信号处理的主要内容	19
1.3.1 现代雷达信号处理若干新技术	19
1.3.2 现代新体制雷达信号处理	21
1.4 现代雷达信号处理的发展趋势	23
1.4.1 信号处理对象的复杂多样	24
1.4.2 信号处理方法的综合交融	24
1.4.3 信号处理实现的灵活实时	26
参考文献	28
第 2 章 现代雷达环境与目标特性	30
2.1 概述	30
2.2 现代雷达环境特性	30
2.2.1 雷达杂波特性	30
2.2.2 雷达有源干扰特性	41
2.2.3 杂波仿真产生方法	43
2.3 现代雷达目标特性	53
2.3.1 目标截面积及特性	54
2.3.2 目标瞬态响应及特性	57
2.3.3 目标极化及特性	60
2.3.4 目标特征信号数值仿真方法	63
参考文献	66
第 3 章 现代雷达信号处理新技术	69
3.1 概述	69
3.2 脉冲压缩技术	69
3.2.1 脉冲压缩处理指标	69

3.2.2	复杂波形及特性	70
3.2.3	脉冲压缩处理方法	77
3.3	干扰抑制技术	84
3.3.1	杂波干扰抑制技术	84
3.3.2	有源干扰抑制技术	90
3.4	信号检测技术	95
3.4.1	统计检测技术	95
3.4.2	特征检测技术	103
3.4.3	恒虚警率检测技术	106
3.5	目标识别技术	117
3.5.1	谐振区目标识别技术	117
3.5.2	光学区目标识别技术	124
3.5.3	极化域目标识别技术	133
	参考文献	135
第4章	相控阵雷达信号处理	139
4.1	概述	139
4.2	常规相控阵雷达信号处理	139
4.2.1	相控阵天线特性	140
4.2.2	波束形成技术	144
4.2.3	多波束形成技术	152
4.3	相控阵预警机雷达信号处理	155
4.3.1	预警机雷达杂波特性	156
4.3.2	相位中心偏置天线技术	158
4.3.3	空时二维自适应处理技术	160
4.4	超视距雷达信号处理	164
4.4.1	天波超视距雷达目标参数估计	164
4.4.2	天波超视距雷达干扰抑制技术	169
4.4.3	目标检测及恒虚警率处理	174
	参考文献	176
第5章	高分辨成像雷达信号处理	178
5.1	概述	178
5.2	合成孔径雷达信号处理	178
5.2.1	合成孔径雷达信号模型与特点	179
5.2.2	合成孔径雷达成像方法	182
5.2.3	相干斑抑制方法	185
5.2.4	合成孔径雷达自动目标检测与分类方法	190
5.3	逆合成孔径成像雷达信号处理	201
5.3.1	逆合成孔径雷达基本原理	201
5.3.2	包络对齐	205

5.3.3	相位聚焦	210
5.3.4	方位向成像方法	213
5.4	干涉合成孔径成像雷达信号处理	218
5.4.1	高程测量的基本原理	218
5.4.2	图像配准	219
5.4.3	去平地效应	223
5.4.4	降噪滤波	224
5.4.5	相位解缠	226
5.4.6	高程图反演	231
	参考文献	234
第6章	无源雷达信号处理	237
6.1	概述	237
6.2	无源雷达系统及信息处理流程	237
6.2.1	基于本身辐射源的无源雷达及信息处理流程	237
6.2.2	基于外辐射源的无源雷达及信息处理流程	239
6.3	参数估计	240
6.3.1	频率参数估计	240
6.3.2	时间参数估计	246
6.3.3	相位参数估计	251
6.3.4	空域参数估计	253
6.4	信号分选	255
6.4.1	预分选方法	255
6.4.2	主分选方法	257
6.5	目标定位	266
6.5.1	多站定位方法	266
6.5.2	单站定位方法	273
6.6	干扰抑制	274
6.6.1	基于自适应滤波的抑制方法	275
6.6.2	基于子空间的抑制方法	277
	参考文献	278
第7章	多输入多输出雷达信号处理	280
7.1	概述	280
7.2	多输入多输出雷达回波模型与系统特点	280
7.2.1	多输入多输出雷达信号模型	280
7.2.2	多输入多输出雷达特点	282
7.3	多输入多输出雷达目标检测	285
7.3.1	观测信息空间分集条件	285
7.3.2	噪声背景下统计检验量及特性分析	286
7.3.3	杂波加噪声背景下检验统计量及特性分析	290

7.4 多输入多输出雷达波束形成与目标定位	293
7.4.1 多输入多输出雷达波束形成	293
7.4.2 多输入多输出雷达目标定位	295
7.5 多输入多输出雷达目标成像	297
7.5.1 实孔径多输入多输出雷达成像	297
7.5.2 合成孔径多输入多输出雷达成像	305
7.5.3 逆合成孔径多输入多输出雷达成像	307
参考文献.....	311

第1章 概 论

雷达作为目标探测的重要手段,自第二次世界大战诞生以来,无论是在民用领域还是军事领域均已得到了广泛的应用。众所周知,雷达对目标的探测主要是通过向空间发射某种特定的信号,然后接收并处理目标的回波来实现的。作为一个信息传输和处理系统,雷达的信号传输过程不可避免地会受到各种外界干扰(包括人为干扰和杂波)及内部噪声的影响,因此,用于消除或降低各种各样干扰、噪声及由这些干扰和噪声引起的不确定性的专门的雷达信号处理设备便应运而生。

事实上,雷达信号处理(RSP)的出现和发展是雷达需求不断提高的必然结果。早期雷达信号处理的目的是主要有两个,即目标检测和定位。这就导致了以傅里叶变换和统计理论为基础的经典雷达信号处理理论和方法的不断丰富和完善。而近年来,低空/超低空突防、反辐射导弹(ARM)、综合电子干扰(ECM)及隐身目标的出现极大地削弱了雷达对目标的探测能力,并对雷达的生存环境提出了严峻挑战。为了降低威胁、应对挑战,许多先进、新颖的雷达技术乃至雷达体制不断涌现和发展。诸如相控阵雷达、超视距雷达、无源雷达、合成孔径与逆合成孔径成像雷达及分布式雷达等具有或部分具有“高灵敏、抗截获、多功能、自适应”能力的雷达新体制和新技术不断提出,并逐渐走向实用。雷达信号处理的功能和目的已经从早期简单的杂波对消和目标检测扩展到复杂波形设计与脉冲压缩、波束控制、干扰抑制、目标成像、特征识别等。各种雷达信号处理方法和技术的研究及实现正在现代雷达系统中发挥着日益重要和广泛的作用,并已构成现代雷达发展的重要分支。

当然,雷达的种类十分繁多,按用途可分为军用和民用两大类;按载体有陆基、海基、空基(机载、球载、飞艇等)及天基等;而按功能主要有搜索/引导雷达、火控/跟踪雷达、气象/航管雷达、监视/成像雷达等。这些不同类型的雷达一般具有不同的体制,它们有不同的发射/接收信号波形,需要获取的信息内容,干扰、噪声的类型和范围及其对信号质量的影响程度不同,这就决定了各种体制和用途雷达中的信号处理理论、方法和技术也不尽相同。为使读者对现代雷达信号处理有较为全面的认识,本书将在《雷达信号处理》的基础上(可参考文献[1]),重点对现代雷达主要新体制和新技术涉及的信号处理理论和方法进行归纳和介绍。作为本书的开篇绪论,本章将主要讨论四个问题:其一,对经典雷达和现代雷达信号处理的一般概念和术语进行界定;其二,概述雷达信号处理的基本理论和方法;其三,阐述了现代雷达信号处理的主要内容;其四,介绍现代雷达信号处理的主要研究热点和发展趋势。

1.1 基本概念与术语

雷达(Radar),又名无线电检测与测距设备,其发展历史可追溯到现代电磁理论发展

的早期。1886年,赫兹(Hertz)首次证明了无线电波具有反射特性,并在其后描述了利用电磁波检测和测量目标速度的概念。1930年,美国海军实验室的Hyland在偶然的机利用电磁波检测到了飞机目标,揭开了雷达作为专门探测设备的飞速发展时期。此后几十年间,雷达系统从简单的电子管连续波体制,迅速发展到具有专用信号处理分机的晶体管脉冲压缩体制,功能也从单纯的目标检测与测距拓展到目标检测、目标尺度参数测量、目标高分辨成像及识别等。系统已从简单的“望远镜”系统,逐渐发展成为具有“显微镜”功能的测量设备。

事实上,雷达系统的发展与雷达信号处理的发展是相辅相成的,雷达体制的革新促使了雷达信号处理新原理、新方法、新技术的出现,而同时雷达信号处理的飞跃又加速了雷达体制的发展。为了使得读者能够较为全面地了解现代雷达信号处理的基本概念、科学内涵和相关术语,本小节将对信号与信号处理、传统雷达与经典雷达信号处理及现代雷达与现代雷达信号处理的概念和术语进行介绍和界定。

1.1.1 信号与信号处理

1.1.1.1 信号

信号(Signal)通常泛指一切可以为人们所能感知的信息(Information),其既包括通过感官可以直接获得的“感知信号”,如光线、声音、气味、味道及温度等,也包括需要通过特殊设备测量得到的“非感知信号”,如电磁波、震动波及力场等。信号的表现形式通常是多样的,不同应用背景下往往具有不同的表现形态,且所蕴含的信息也不尽相同。本书仅结合雷达中各种信号的表现形式对信号的分类予以简要介绍。

1. 确定性信号与非确定性信号

若信号可以由一确定的数学表达式所表示,或者信号的波形是唯一确定的,这种信号就是“确定性信号”。反之,如果信号具有不可预知的不确定性,则称之为“随机信号”或“不确定性信号”。任意给定一个自变量的值,对确定性信号,我们可以唯一确定其信号的取值;而对随机信号,其取值却是不确定的。

在雷达中,雷达发射信号,如线性调频信号、相位编码信号及扫频信号等通常为确知信号,而其对应的接收信号,由于噪声、杂波及干扰的存在,则为随机信号。

2. 模拟信号与数字信号

模拟信号是指定义域和值域均连续的信号,因此模拟信号必定是时间连续信号。而数字信号是指定义域和值域均离散的信号,因此数字信号肯定是时间离散信号。数字信号一般通过模拟信号的模数转换得到,其中模数转换每隔一个固定的时间间隔对模拟信号进行采样,并把该取值量化成为一些离散的数值。

在雷达中,发射机发射信号和接收机中频采样前的回波信号通常为模拟信号。为了方便信号的后续数字化处理,中频采样后的回波信号时间和幅度取值通常为离散值,即是数字信号。

3. 因果信号与非因果信号

如果一个信号只在自变量的非负半轴左闭区间 $[0, +\infty)$ 取非零值,而在 $(-\infty, 0)$ 开区间内取值均为零,则称其为因果信号,否则就称为“非因果信号”。使用“因果”这一术语的目的,主要是为了表明我们无法产生一个在无穷远的过去都有值的信号。特别地,对

于离散时间信号,可以将因果信号和非因果信号分别改称为“因果序列”和“非因果序列”。

在雷达中,由于系统的因果特性,接收回波通常均为因果信号,中频采样前的常为因果模拟信号,而中频采样后的信号则为因果序列。

4. 高斯信号与非高斯信号

若随机信号(过程) $x(t)$ 的概率密度函数服从

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.1.1)$$

式中: μ 为均值, σ^2 为方差,则称其为高斯信号;若不满足上述分布函数,则称之为非高斯信号。特别地,在离散域,其分别被称为高斯序列和非高斯序列。

在雷达中,常规低分辨率雷达地物回波通常可认为是高斯信号,幅度服从瑞利分布,而对于高分辨率雷达,地/海杂波的回波幅度分布明显偏离瑞利分布,具有较长的“尾巴”,通常符合对数正态分布、韦布尔分布或 K 分布等。

5. 平稳信号与非平稳信号

若随机过程 $\{x(t_1), x(t_2), x(t_3), \dots, x(t_n)\}$ 的联合分布函数和随机过程 $\{x(t_1 + \tau), x(t_2 + \tau), x(t_3 + \tau), \dots, x(t_n + \tau)\}$ 的联合分布函数对所有 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ 和 $\tau \in T$ 都相同,则随机过程 $\{x(t), t \in T\}$ 称为严格平稳随机信号或狭义平稳信号。按此定义可以看出,平稳信号的概率分布对于时间移位具有不变性。若随机过程 $\{x(t), t \in T\}$ 满足如下关系

- (1) $E\{x(t)\} = m, m$ 为常数;
- (2) $E\{|x(t)|^2\} < \infty$;
- (3) $E\{[x(t) - m][x(s) - m]^*\} = R_x(t-s) - |m|^2$ 。

式中: $R_x(t-s) = E\{x(t)x(s)^*\}$,“*”代表复共轭,则称其为广义平稳随机信号。通常广义平稳也称为弱平稳、二阶平稳等。若一个信号是非广义平稳的,即某阶统计量随时间改变,则称它为非平稳信号。

在雷达中,大多数条件下,低分辨雷达接收回波的统计特性是不随时间变化的,即为平稳随机信号,然而随着雷达分辨率的提高,高分辨率雷达杂波数据,尤其是较长观测时间内的海杂波数据呈现非平稳特性,其统计特性具有了明显的时变性。

1.1.1.2 信号处理

信号处理(Signal Processing)通常是对原始信号进行提取、变换、分析、综合等处理过程的统称,其主要目的就是去除信号中冗余和次要的成分,把信号变成易于进行分析和识别的形式,或把信号变成易于传输、交换与存储的形式,或从调制信号中恢复出原始信号等。由于信号处理所具有的独特作用,使得其在众多领域,如通信信号自适应码调制、自适应均衡、纠错、加密、译码、扩频、回波对消;话音信号的增强、压缩识别;图像信号的压缩、增强、变换、分割、重建等;雷达和声呐信号的滤波、参数估计、检测、成像、特征抽取及识别等得到广泛应用。就信号处理本身而言,其涉及的概念十分繁多,不同应用背景处理方式和手段的定义往往存在较大差异。下面对几个常用信号处理概念予以简要介绍。

1. 模拟信号处理

事实上,模拟信号处理(ASP)的研究可追溯到信号处理理论发展的早期。ASP的

处理对象主要为连续信号,其目的是通过模拟器件和电路来实现对观测信号的简单分析与处理。这一时期,受制于器件水平和实现方式,信号处理主要以统计信号处理的理论和方法作为理论基础。主要研究内容包括平稳信号的检测、参数估计和滤波。其中信号检测中涉及的处理方法有似然比检测和多种变形及基于最大信噪比准则的匹配滤波;信号参数估计涉及的统计信号处理方法有贝叶斯估计、最大似然估计、最小二乘估计及最小均方估计等;信号滤波中涉及的统计信号处理方法有维纳滤波和卡尔曼滤波等。

2. 数字信号处理

一般来说,数字信号处理(DSP)的处理对象为离散信号序列,其主要目的是通过计算机或专用数字电路实现对信号序列的参数估计、滤波和检测等,常用的处理手段主要有数值分析(如内插、积分、微分等)、频谱分析和各种数字滤波处理。尤其是,1965年快速傅里叶变换算法的提出,极大地促进了复杂信号处理理论和算法的数字化实现与应用,DSP的应用范围得到有效扩展,如信号的编码、解码、增强、重建及识别等。目前,DSP主要研究内容包括信号采集理论、离散信号滤波与快速算法及信号处理方法的数字实现技术等。

3. 现代信号处理

现代信号处理(MSP)概念的出现是随着应用领域的不断扩展而出现的。目前,对于MSP并没有严格的定义。MSP的处理对象为非高斯、非平稳和非线性信号,其主要目的是通过先进处理方法实现对信号局部特性的分析、提取和辨识等。MSP涉及的研究内容包括复杂信号的分析、特征提取与辨识方法,如针对非平稳信号分析与特征提取的短时傅里叶变换、离散高伯(Gabor)展开、维格纳分布、小波变换、自适应时频变换等多种时—频分析方法,针对非高斯信号分析和特征提取的高阶谱分析方法及基于信号辨识的模糊理论、神经网络、遗传算法、支撑向量机等人工智能信号处理方法等。

1.1.2 早期雷达、传统雷达和现代雷达

雷达自20世纪30年代初作为探测电离层的科研工具开始,至今已有80余年的历史。雷达装备的发展,不仅受到军事斗争和民用事业需求的牵引,而且更依赖于一系列关键技术成功突破与应用。关键技术的每次突破,往往会使雷达性能形成质的飞跃。就雷达装备发展历程而言,我们认为其大体经历了如下重要阶段,即早期雷达、传统雷达和现代雷达三个时期,这与参考文献[2]中分为雷达的启蒙阶段、雷达的发展阶段和现代雷达阶段三个阶段是基本一致的。

1.1.2.1 早期雷达

第二次世界大战期间,由于军事上的迫切需要,雷达获得广泛的应用和发展。1936年英国首次将雷达应用于军事领域,部署了第一部称为“本土链”的短波对空警戒雷达,正式揭开了雷达装备发展的序幕。早期雷达一般由五部分组成,即大家熟悉的产生高功率射频信号的发射机、传输信号的天线与馈源、承担回波信号变频、放大及检波的接收机、作为终端的显示器及协调整机工作的监控伺服系统,其基本组成框图如图1.1所示,其主要特点表现为:

(1) 体制上,主要以机械扫描天线、非相参或准相参(部分相参)、单级振荡(三、四极

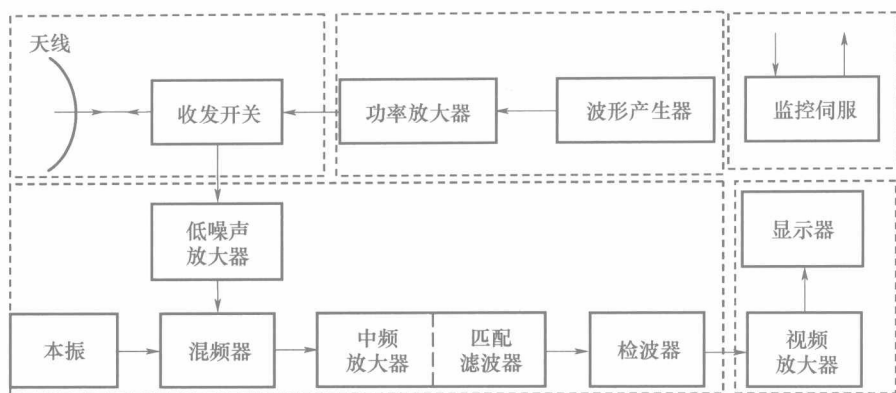


图 1.1 早期雷达典型组成框图^[3]

电子管或磁控管)发射机等为标志;

- (2) 功能上,主要用于目标的检测和位置参数的测量;
- (3) 处理方式上,完全依赖人工,不具备信号处理能力。

这一时期,雷达系统的实现主要由模拟器件和电路来完成,尽管接收机也具有了一定的信号滤波功能,但雷达整机中并没有专门的信号处理设备,对于目标参数的测量和干扰抑制完全由雷达操作人员根据显示终端上目标回波的特点来完成,因此,早期雷达目标参数测量和抗干扰能力均较弱。

1.1.2.2 传统雷达

20 世纪 60 年代随着弹道导弹、喷气式飞机及卫星等目标的出现,对雷达提出了高精度、远距离、高分辨率及多目标测量等要求,促使了雷达进入蓬勃发展的新阶段。多种新器件和新技术的发明使得雷达的整机性能得以极大提高,如低噪声行波管、参量放大器、隧道二极管放大器等的的应用,使雷达接收机灵敏度大为提高,增大了雷达作用距离;微波高功率放大管的试制成功,促使了主控振荡器——功率放大器型的高功率、高稳定度的雷达发射机的诞生;数字电路和计算机技术的发展及在雷达系统实现中的应用,使雷达的结构组成和设计发生根本性的变化;脉冲压缩技术的出现,使得传统雷达分辨率大大提高,同时也开启了雷达信号处理作为独立分系统的大门;而全相参技术的提出,则有效增强了传统雷达的杂波抑制和目标检测能力。这一时期,典型雷达装备基本组成框图如图 1.2 所示。

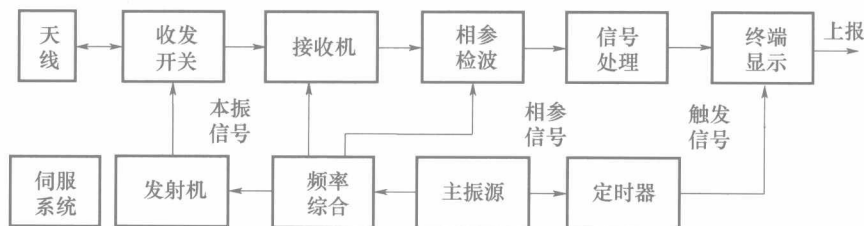


图 1.2 典型传统雷达组成框图^[4]

其主要特点表现为:

- (1) 体制上,主要以机械扫描天线、脉冲压缩和全相参、主振放大式发射机等为主要标志;

(2) 功能上,主要用于目标的检测和位置、速度等参数的测量;

(3) 处理方式上,采用多种方法和技术,实现了面向杂波的信号处理与雷达半自动控制,具备了一定的抑制杂波和抗有源干扰能力等。

不同于早期雷达,传统雷达普遍采用了微电子器件、模块化电路及中、大规模电路,并与计算机技术实现了初步结合,使得雷达的使用、维护具有较高程度的自动化处理水平,雷达的机动能力、信号处理水平、可靠性及复杂环境适应能力均有了显著提高。在雷达性能不断提高的同时,雷达探测目标、环境和生存条件变得日益复杂和严峻,低空/超低空突防、反辐射导弹、综合电子干扰和隐身目标构成了所谓的“四大威胁”,对传统雷达的探测和生存提出了严峻的挑战,使得传统雷达及局限于傅里叶变换和经典统计信号处理理论的雷达信号处理难以满足情报获取的要求。

1.1.2.3 现代雷达

为了适应上述要求,雷达界已经并在持续开展新机理、新体制雷达及信号处理新原理和新方法的研究,雷达装备的发展走向现代。雷达所采用的探测方式从有源走向有源/无源并举,从单基地走向单基地与多基地共存,雷达所采用的频段不断向微波波段的低端和高端延伸,系统带宽从窄带走向宽带和超宽带,天线也由传统机械扫描的单孔径天线发展为电控的多孔径阵列天线。相继提出了相控阵雷达、无源雷达、高分辨成像雷达及分布式雷达等新体制雷达,并把自适应滤波处理、空时二维处理、阵列信号处理、现代谱估计理论、时频变换、智能信号处理等现代信号处理理论和方法应用于雷达的信号处理。同时,随着军事需求的推动,目标识别功能成为现代雷达的研究热点。雷达所涉及的体制、功能和对象有了极大的扩展和丰富,雷达天线、发射机、接收机、信号处理机及数据处理机之间的界限变得模糊起来,逐渐克服了传统雷达的体制和信号处理上存在的缺陷,使得雷达的威力、精度、分辨率、电子战能力及对目标和环境的适应能力均有了划时代的提高。这一时期典型雷达装备的基本组成框图如图 1.3 所示。

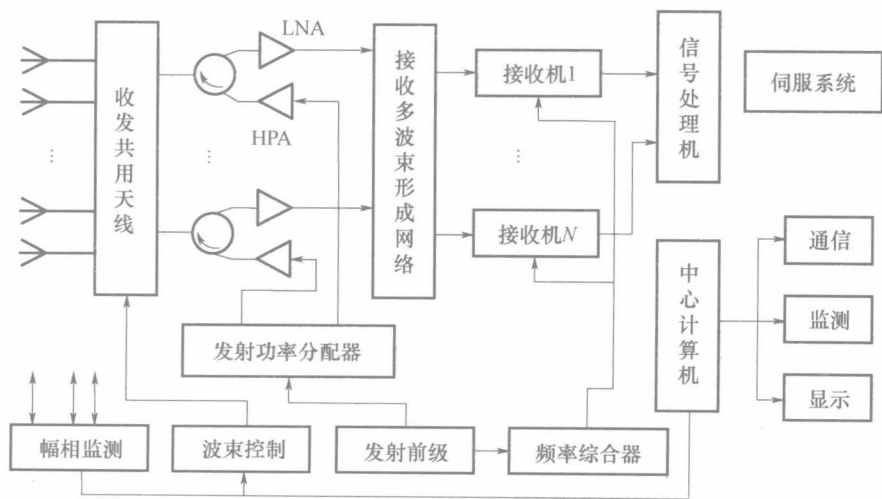


图 1.3 典型现代雷达组成框图^[5]

其主要特点表现为:

(1) 体制上,现代雷达除了继续采用脉冲压缩和全相参外,逐渐实现了天线的阵列化和相扫/频扫、发射机的固态化;

(2) 功能上,现代雷达除了具有对目标检测和位置、速度、加速度等尺度参数测量能力外,还部分具备了目标特征参数,如形状、材质及属性等的测量能力;

(3) 处理方式上,基本实现了雷达整机的计算机控制,并且许多现代信号处理的理论和方法逐步在雷达信号处理中得以应用。

同时,相比传统雷达,现代雷达普遍采用了模块化设计、超大规模集成电路、光纤集成和多路传输技术及计算机控制技术等,雷达使用、维护的自动化水平及“四抗”能力进一步得以提高。

1.1.3 经典雷达信号处理与现代雷达信号处理

事实上,现代雷达和经典雷达及现代雷达信号处理和经典雷达信号处理是一个相对的概念,并随着雷达体制的发展而不断更新。因此,严格地界定现代雷达信号处理和经典雷达信号处理是困难的。为了使得读者能够较为清楚地认识现代雷达信号处理和经典雷达信号处理之间的差异,本节我们将在回顾雷达发展历程的基础上,对经典和现代雷达信号处理的内涵进行描述。

1.1.3.1 经典雷达信号处理

关于经典雷达信号处理的研究,可追溯到1943年诺思(North)等人的工作。其时,诺思等人就如何设计雷达接收机使之对脉冲或连续波信号获得最佳的信噪比进行了大量的研究,提出了匹配滤波器理论,大大推动了雷达检测能力的提高。1950年伍德沃德(Woodward)将香农(Shannon)的基础信息论推广应用于雷达信号检测,其后人们根据不同应用,又进一步提出了多种基于统计判决的最佳准则检测方法,这些基本理论的建立标志着经典雷达信号检测理论的形成。1953年伍德沃德又在其著名的《概率论和信息论在雷达中的应用》中提出了雷达模糊原理,并首次建立波形设计思想,这不仅有力促进了雷达信号理论的发展,也为雷达信号处理奠定了基础。但正式使用雷达信号处理这一术语,已是20世纪50年代末。其间,在实现雷达信号最优统计处理的前提下,传统脉冲雷达在同时提高作用距离、距离测量精度及分辨率方面越来越呈现不可克服的矛盾,这就导致了今日通称为脉冲压缩技术的出现。脉冲压缩技术在雷达中的成功运用,标志着雷达信号处理自立为一门学科的开始。

1993年,内桑森(Nathanson)等在其著名的《雷达设计原理》一书中,给雷达信号处理下了这样的定义:雷达信号处理这一术语的含义,包括各种不同雷达发射波形的选择、检测理论、性能评估及天线与显示终端或数据处理计算机之间的电路装置等。按照这一定义,经典雷达信号处理的任務可概括为两个:一是信号检测,二是参数估值。前者所要解决的问题是受扰观测中目标有无的判决问题,后者所要解决的问题则是受扰观测中目标尺度参数,尤其是距离和方位的确定问题。针对这些问题,动目标显示(MTI)技术首先被用于雷达杂波抑制。20世纪70年代初,人们相继提出了动目标检测(MTD)、脉冲多普勒(PD)技术、基于恒虚警率处理(CFAR)和杂波图的自适应门限技术等,构成了基于傅里叶变换和经典统计理论的经典雷达信号处理的主要内容。关于这些经典雷达信号处理技术的原理和实现方式,