

新型雷达原理与技术

张朝霞 著



科学出版社

新型雷达原理与技术

张朝霞 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书研究几种超宽带雷达的机理与技术;探讨超宽带雷达的性能指标及表征方法;介绍大时宽-带宽信号的工作机理及性能分析;深入开展超宽带脉冲压缩雷达的工作机理和组合脉冲对超宽带雷达盲区减小的影响、伪码-多项式拟合非线性调频组合调制雷达信号的性能分析、截断式压缩脉冲解决单基站雷达盲区的设计、K-MMSE 滤波器旁瓣抑制雷达系统、宽带混沌雷达信号设计、认知跟踪雷达相关问题及认知雷达扩展目标探测等研究。

本书可供雷达原理与技术、雷达信号处理领域的高年级本科生、研究生、科研工作者和工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

新型雷达原理与技术/张朝霞著. —北京:科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-050416-6

I. ①新… II. ①张… III. ①雷达技术 IV. ①TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 257587 号

责任编辑:张艳芬 高慧元 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝 正

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2016 年 10 月第一次印刷 印张:12

字数:229 000

定价:70.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

近年来,随着新型雷达理论与技术的兴起,将不同体制雷达理论与新技术相结合,探索其在不同领域的应用研究,成为国内外新型雷达研究的主要热点。本书是作者近几年在超宽带雷达、混沌雷达与认知雷达等领域研究成果的比较全面的总结,希望读者通过本书能够对这三种宽带雷达及其信号处理方法有比较全面的了解。

全书共 8 章。第 1 章主要介绍超宽带雷达、混沌雷达、认知雷达发展的趋势,以及各自的发展现状。第 2 章主要分析匹配滤波及模糊函数的机理及表征方法。第 3 章介绍大时宽带宽积信号性能分析及穿墙仿真,主要包括超宽带二相编码信号的脉冲压缩处理和时域有限差分法实现穿墙探测仿真。第 4 章主要介绍组合脉冲信号性能分析及减小盲区的研究,包括超宽带组合脉冲信号设计及仿真、伪码-多项式拟合非线性调频组合调制信号的性能分析和截断式压缩脉冲解决单基站雷达盲区的设计。第 5 章对 K-MMSE 滤波器旁瓣抑制系统进行分析与介绍,包括 MMSE 算法优化超宽带脉冲压缩雷达系统和基于 K-MMSE 滤波脉冲压缩算法。第 6 章主要介绍宽带混沌雷达信号设计与研究,包括混沌序列产生方式、混沌序列的优化及宽带混沌调频雷达信号的设计与性能分析。第 7 章主要研究认知跟踪雷达相关问题,包括认知雷达目标跟踪中的滤波算法、迭代容积卡尔曼滤波及目标跟踪算法仿真等。第 8 章对认知雷达扩展目标探测进行研究,分别介绍基于模糊函数、最大信噪比、信息论的波形设计方法,最后研究扩展目标探测波形设计方法。

本书得到了国家自然科学基金面上项目(61575137,61377089)、山西省自然科学基金面上项目(2013011019-6)、山西省教育厅科技创新项目(2014112)、山西省科学技术发展计划(工业)项目(20140321003-02)、太原市万柏林区科技项目(20140306)等项目的资助,在此一并表示衷心的感谢。此外,本书还得到许多同仁的大力支持。作者要特别感谢长江大学肖柏勋教授、太原理工大学杨玲珍教授、王娟芬副教授给予的大力支持与帮助。太原理工大学的硕士研究生周俊杰、傅正、张东泽、闫东、王慧慧、赵岩、胡秀、牛阔和麻晓朋为本书的整理出版做了大量工作,在此一并表示感谢。

限于作者水平,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

张朝霞
2016 年 6 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 雷达研究背景及意义	1
1.2 超宽带雷达研究背景及意义	2
1.3 超宽带雷达的应用研究	2
1.4 超宽带脉冲压缩雷达的发展	4
1.5 超宽带脉冲压缩雷达的问题	5
1.5.1 探测盲区问题的存在	5
1.5.2 组合调制信号的性能分析和减小探测盲区	5
1.5.3 脉冲压缩雷达距离旁瓣抑制技术	6
1.6 混沌雷达的发展	6
1.7 宽带混沌雷达信号设计与研究	8
1.8 认知雷达的概念	9
1.9 认知雷达的发展	10
1.10 后续章节安排	13
第 2 章 匹配滤波及模糊函数	15
2.1 匹配滤波	15
2.1.1 最佳线性滤波器	15
2.1.2 匹配滤波与相关器的关系	17
2.2 模糊函数	18
2.2.1 模糊函数的定义	18
2.2.2 模糊图与分辨率	19
2.3 本章小结	21
第 3 章 大时宽-带宽积信号性能分析及穿墙仿真	22
3.1 线性调频脉冲信号的脉冲压缩处理	22
3.1.1 线性调频脉冲信号及其特性	22
3.1.2 线性调频信号的脉冲压缩仿真分析	27
3.2 超宽带二相编码信号的脉冲压缩处理	30
3.2.1 二相编码信号及其特性	30
3.2.2 伪随机码调制的二相编码脉冲序列	32

3.3	组合调制信号的性能分析	36
3.3.1	常见的组合调制信号	36
3.3.2	伪码-线性调频组合调制	36
3.4	雷达信号形式的复杂化	39
3.5	脉冲拉伸信号处理	39
3.6	线性调频信号及二相编码性能分析与比较	41
3.7	时域有限差分法实现穿墙探测仿真	43
3.7.1	时域有限差分法	43
3.7.2	墙体透射系数仿真与计算	47
3.8	超宽带脉冲压缩穿墙雷达过程仿真	49
3.9	本章小结	51
第4章	组合脉冲信号性能分析及减小盲区的研究	53
4.1	雷达系统探测盲区问题	53
4.2	有效检测脉压系数范围	56
4.3	超宽带组合脉冲信号设计及仿真	57
4.3.1	超宽带组合脉冲信号设计	57
4.3.2	探测性能仿真	58
4.4	伪码-多项式拟合非线性调频组合调制信号及仿真	60
4.4.1	基于驻留相位原理的非线性调频信号产生	60
4.4.2	伪码-非线性调频组合调制信号	62
4.5	伪码-多项式拟合非线性调频组合调制信号的性能分析	65
4.5.1	多项式拟合非线性方法	65
4.5.2	伪码-多项式拟合非线性调频组合调制信号的仿真	66
4.5.3	常见组合调制信号的性能对比分析	66
4.6	截断式压缩脉冲解决单基站雷达盲区的设计	68
4.6.1	单基站脉冲压缩雷达盲区问题	68
4.6.2	截断式压缩脉冲的设计	69
4.6.3	截断式压缩脉冲的探测性能仿真及分析	71
4.7	本章小结	73
第5章	K-MMSE 滤波器旁瓣抑制系统	75
5.1	基于窗函数的旁瓣抑制	75
5.2	最小均方误差算法	78
5.2.1	最小均方误差估计原理	78
5.2.2	最小均方误差算法仿真	80

5.2.3	MMSE 算法优化超宽带脉冲压缩雷达系统	81
5.2.4	多次 MMSE 滤波器原理	83
5.3	基于 K-MMSE 滤波脉冲压缩算法	85
5.3.1	点扩散函数	85
5.3.2	卡尔曼滤波	85
5.3.3	K-MMSE 算法	87
5.3.4	K-MMSE 滤波器计算机仿真	88
5.4	本章小结	91
第 6 章	宽带混沌雷达信号设计与研究	92
6.1	混沌序列产生方式	92
6.1.1	混沌概述	92
6.1.2	映射产生混沌	94
6.1.3	激光器产生混沌	98
6.1.4	小结	101
6.2	混沌序列的优化	101
6.2.1	映射混沌序列的优化	101
6.2.2	激光混沌的优化	107
6.2.3	小结	110
6.3	宽带混沌调频雷达信号的设计与性能分析	110
6.3.1	雷达调频信号的设计	110
6.3.2	信号性能指标分析	112
6.3.3	仿真分析	113
6.3.4	小结	118
6.4	本章小结	118
第 7 章	认知跟踪雷达相关问题研究	119
7.1	数学模型	119
7.1.1	发射波形模型	119
7.1.2	目标状态空间模型	120
7.2	整体框架设计	120
7.2.1	容积卡尔曼滤波	121
7.2.2	量测噪声协方差	123
7.2.3	波动态选择方法	123
7.3	正弦波调制混沌信号	126
7.3.1	混沌信号	126

7.3.2 正弦波调制的混沌信号	126
7.4 认知雷达目标跟踪中的滤波算法	130
7.4.1 卡尔曼滤波	131
7.4.2 扩展卡尔曼滤波	134
7.4.3 无迹卡尔曼滤波	136
7.5 迭代容积卡尔曼滤波	137
7.5.1 算法原理	138
7.5.2 算法流程	139
7.6 目标跟踪算法仿真	141
7.7 本章小结	143
第8章 认知雷达扩展目标探测研究	144
8.1 认知雷达目标模型	144
8.1.1 点目标回波的数学模型	145
8.1.2 扩展目标回波的数学模型	147
8.2 波形优化设计原理	149
8.3 基于模糊函数的波形设计方法	150
8.3.1 波形设计	150
8.3.2 驻留相位原理对相位近似求解	151
8.4 基于最大信噪比的波形设计方法	155
8.4.1 点目标模型下发射波形与输出信噪比之间的关系	156
8.4.2 扩展目标模型下发射波形与输出信噪比之间的关系	156
8.5 基于信息论的波形设计方法	158
8.5.1 信息论基本知识	158
8.5.2 平均互信息在雷达中的应用	159
8.5.3 噪声环境下平均互信息与发射波形之间的关系	160
8.6 目标检测与发射波形的关系	161
8.7 扩展目标探测波形设计	163
8.7.1 认知雷达扩展目标探测模型	163
8.7.2 时域波形设计方法	165
8.7.3 扩展目标探测波形仿真分析	167
8.8 本章小结	170
参考文献	172

第 1 章 绪 论

1.1 雷达研究背景及意义

雷达(radar)^[1-3]是英文“radio detection and ranging”的缩写。雷达系统通过辐射电磁波和检测从目标反射的回波信号实现其测距和测速功能。雷达系统发射的信号本身不具有任何信息,它只是信息的运载工具;回波信号的本质是提供被测目标的信息,其携带着被测目标的全部信息,而对目标位置的判断则是通过所发射的电磁波往返于被测目标所用的时间来实现的。

雷达诞生于第二次世界大战期间,被广泛运用于军事领域,当时已出现了地对空和具有敌我识别功能等的雷达技术。近年来,随着微电子等各领域科学的进步,雷达技术进入了一个新的发展阶段。雷达的应用范围也从军事领域向其他领域发展,目前已经出现运用于探雷、资源勘测、人员搜救等的各种探测雷达。此外,气象、天文、遥感测绘、汽车导航、交通管制等民用领域,对雷达的需求数量远远大于军用领域。

早期的雷达一般由五部分组成:高功率射频信号的发射机;传输信号的馈源、馈线;承担回波信号变频、放大及检波的接收机;系统终端的显示器;控制天线转动、协调全机工作的伺服监控分机。在这五部分中由于没有专门的信号处理设备,因此早期的雷达系统不具备信号处理能力,这也是由当时的电子技术总体水平决定的。雷达信号理论最初的形成时间是 20 世纪四五十年代。1949 年,Wiener^[4]建立了最佳线性滤波和预测理论。1943 年,Rihaczek^[5]提出了匹配滤波理论,大大推动了雷达检测能力的提高。1950 年,Woodward 把 Shannon 基础信息论推广应用于雷达信号检测,提出了诸多基于统计判决的最佳准则检测方法,标志着经典雷达信号检测理论的形成。1953 年,Woodward^[6]又在其著作《概率论和信息论在雷达中的应用》中提出了雷达模糊原理,奠定了雷达信号的基础,促进了雷达信号理论的发展。20 世纪 70 年代,由于数字技术得到了一定的发展,雷达信号处理领域开始结合数字技术,雷达信号处理呈现出蓬勃发展的趋势。其后,雷达信号处理算法也得到了长足的发展,新的信号处理理论逐步进入雷达信号处理领域^[7]。模糊理论、神经网络、遗传算法等学科都相继融入雷达信号处理算法。2006 年,Haykin 教授正式提出了认知雷达的概念,其中基于知识的智能信号处理技术更是对新的雷达信号处理算法提出了更高的要求。雷达信号处理技术的进

步也是促使整个雷达技术快速发展的重要因素之一。

1.2 超宽带雷达研究背景及意义

对雷达需求的提高是雷达信号处理出现和发展的重要因素之一,同时是对传统雷达技术的严重挑战。目前,这一挑战主要是指现代雷达所面临的四大威胁,即低空/超低空突防、反辐射导弹、综合电子干扰和隐身目标^[8]。因此,有学者提出了具有“四抗”性能的先进雷达,同时先进雷达必须具备“高灵敏、抗截获、多功能、自适应”的综合特点。为具备这些特点,许多雷达技术在雷达界引起了人们的广泛关注,其中超宽带(ultra wide band, UWB)雷达技术就是其中发展最快的雷达技术之一。

超宽带雷达的定义最早是由美国联邦通信委员会(FCC)^[9]给出的,通常定义为:−10dB 相对带宽超过 25%,也就是通常所说的雷达发射信号的分数带宽(FBW)大于 0.25 的雷达。其技术^[10]就是通过对非常短的单脉冲进行一系列的加工和处理,包括产生、传输、接收和处理等,实现通信、探测和遥感等功能。超宽带雷达具有大带宽的特点,与常规窄带雷达系统相比,具有以下五个优点^[11]:①抗干扰性强;②兼顾低频和高频的特点,具有较强的穿透能力;③具有极高的距离分辨率;④具有良好的目标识别能力;⑤具有超近程探测能力。基于这五大优点,超宽带雷达符合先进雷达关于“四抗”的要求,是一种值得深入研究与大力发展的雷达技术。2002 年 2 月 14 日,FCC^[12]通过了一项允许超宽带技术民用的最终许可。其中将用于地质勘探及可穿透障碍物技术支持的高分辨率成像系统作为规定的用途之一。此后,基于超宽带微波信号自身优良特性的强穿透、高分辨率穿墙雷达生命探测技术成为遥感探测领域的研究特点^[13,14]。

1.3 超宽带雷达的应用研究

超宽带雷达系统于 20 世纪 90 年代在美国洛斯阿拉莫斯国家实验室召开的超宽带雷达会议上被首次提出。FCC 通过允许超宽带技术民用的最终许可之后,人们研发出了很多民用方面的超宽带雷达探测装置,其中一个应用就是将超宽带雷达技术用于生命探测领域。

日本东京大学的 Suzuki^[15,16]课题组、麻省理工学院林肯实验室、美国休斯顿大学先进电磁技术研究中心等在这方面均取得了一定的成果。美国时域公司(Time Domain Corporation, TDC)开发出 RV1000(Radar Vision 1000)的超宽带探测雷达,该雷达采用 TM-UWB(time modulated ultra-wideband)专利技术,能够检测到非金属墙壁后运动的物体。2008 年,美国宾夕法尼亚州立大学的 Naray-

anan^[17]将基于热噪声的超宽带随机噪声雷达用于穿墙探测,获得了比常规超宽带雷达更高的分辨率和更好的杂波抑制效果,并且装置简易,性能稳定。我国第四军医大学生物医学工程系的课题组^[18-20]于1998年开始研究生命探测雷达,研制出了不同频段的连续波生物超宽带雷达样机,自由空间探测距离可达50m,能穿透2m厚的实体砖墙并检测到人体的呼吸信号。他们所研制的生命探测仪于2004年在北京通过了相关部门的鉴定,填补了我国在这一领域的空白。电子科技大学的李文超等^[21]研究了生命特征信号的检测,黎海涛等^[22]系统地对超宽带目标回波信号进行建模,崔国龙^[23]则将合成孔径技术应用于超宽带雷达系统,取得了不错的效果。我国西安电子科技大学^[24-28]则分别从超宽带雷达的硬件设计、生命特征信号的识别方法及成像算法方面开展了相关研究。这些成果都得益于超宽带雷达自身优异的性能。

另外,由于探地雷达具有设备便携、距离分辨率高等特点,因此国内外学者^[29-32]相继开展了其在管道泄漏检测中的研究,并取得了重要进展,使得探地雷达成为管道泄漏检测方法中的主要研究热点。巴西联邦大学^[29]利用探地雷达和监控系统检测地下储罐泄漏产生的汽油污染,雷达探测频率在200~400MHz时具有较理想的距离分辨率。意大利国家计量院^[30]和萨兰托大学^[31]分别利用探地雷达检测泄漏水管旁土壤的孔洞来定位埋地水管的泄漏点,但在实验过程中,仅有几十厘米级的探测距离。土耳其梅尔辛大学^[32]将探地雷达用于探测浅埋于地下的水管泄漏。通过不同时刻对地下水管进行扫描得到连续B超探地雷达测量值,利用反投影算法对相应的时序B超图像进行重建,扫描结果会显示出管道泄漏处的空洞区域或变形的管道特征,从而判断出管道的泄漏位置。国内探地雷达用于泄漏检测的有清华大学^[33]、青岛安全工程研究院^[34]和特种设备检测研究院^[35]等。其中,青岛安全工程研究院^[34]基于探地雷达法和气相色谱分析加油站埋地油罐泄漏快速检测方法,可检测泄漏位置和泄漏量。特种设备检测研究院^[35]对PE管的泄漏进行探测,探测深度及精度基本满足其要求。

最近,将探地雷达和红外摄影(IR)相结合的技术^[36]成为一种新的探测管道泄漏的方法。利用探地雷达技术确定管线的埋藏位置,红外摄影图像显示泄漏位置,然后将探地雷达图像和红外摄影图像重合来比较管线位置和泄漏位置。这一方法在探测管道泄漏中取得了成功应用。

在探地雷达中,为进一步提高其定位精度,有研究者提出将超宽带技术与探地雷达相结合的超宽带探地雷达。超宽带探地雷达^[37-39]具有采用穿透力、分辨率高、定位准确、功耗低等特性。但是,为保证具有较高距离分辨率,要求采用较窄脉冲宽度,这样就会导致探测深度较浅。为了解决这个问题,混沌超宽带雷达进入人们的视野。混沌信号具有强抗干扰、类噪声、不可复制等特性,受到各科研机构广泛关注。太原理工大学课题组^[40-42]、浙江大学^[43,44]课题组分别采用混沌超

宽带激光或混沌超宽带电路产生的信号在相关测距和远距离雷达中实现了高距离分辨。随后,利用混沌 Colpitts 电路实现了在空间雷达测距中 0.08m 的距离分辨率和 7.3m 的探测距离^[41];另外将混沌超宽带雷达用于单目标测距中,可实现 0.03m 的距离分辨率和 8m 的探测距离^[43]。浙江大学^[44]利用混沌雷达实现了 0.1275m 的距离分辨率。

综上,超宽带雷达技术正在各个领域开展卓有成效的应用研究。

1.4 超宽带脉冲压缩雷达的发展

超宽带雷达系统由于其极大的带宽及距离分辨率使其在生命探测及探地领域“大显身手”,然而大带宽在带来高测距精度的同时也带来了信号衰减严重、探测距离较近等问题。因此,如何使得超宽带雷达系统具有极高探测精度的同时,又提高其作用距离等性能指标是雷达探测所要解决的关键问题之一。

传统的单载频脉冲信号的时宽-带宽积近似为 $BT=1$,也就是说大时宽和大带宽不可兼得。当采用这种信号时,测距精度和距离分辨率与作用距离及测速精度与速度分辨率之间存在着矛盾。为解决这一矛盾,必须采用具有大时宽-带宽积的复杂信号形式^[45]。受匹配滤波器思想的启发,有研究者^[46-48]提出将脉冲压缩技术应用于超宽带雷达体系中,在其峰值发射功率受限的情况下,采用大脉冲发射以提高其发射的平均功率,保证了其探测距离,而在接收端采用匹配滤波器进行脉冲压缩,获得窄脉冲信号,在保证雷达系统距离分辨率的同时提高雷达检测能力,因此可以有效解决距离分辨率和测距精度之间的矛盾,增强了系统的抗干扰能力,提高了系统发现目标的能力。因此,脉冲压缩雷达(pulse compression radar)实际上是一种发射已调制(或编码)的宽脉冲,对回波信号进行压缩处理得到窄脉冲的雷达。

20 世纪 50 年代,人们提出了雷达模糊理论,该理论基于雷达的距离分辨率与发射宽度无关、雷达距离分辨率只和有效相关带宽有关、速度分辨率只和时间持续宽度有关等基础理论。因此,只要对发射宽脉冲进行编码调制,使其具有大的频带宽度及时间持续宽度,对目标回波进行匹配滤波处理后就能获得分辨率很好的窄脉冲输出。基于这一点,只要雷达发射信号的有效相关带宽和时间持续带宽都足够大,雷达就能同时具有大的作用距离和高的分辨率,还可以使单一脉冲具有较好的速度分辨率。早期的脉冲压缩一般利用模拟器件实现匹配处理,如利用具有频率色散特性的声表面波器件(SAWD)等。随着数字集成技术的进步及大规模集成电路的广泛应用,许多雷达系统的设计中加入了数字脉冲压缩处理方法。数字处理给脉冲压缩技术带来了更大的灵活性、更高的可靠性和精确性。基于这些优点,数字脉冲压缩正在或已经替代模拟器件进行脉冲压缩处理。最常用

的数字脉冲压缩实现方法有三种:时域卷积法、频域滤波法和快速傅里叶变换(FFT)法。通常人们根据发射信号的调制方式对脉冲压缩雷达进行分类,主要有以下几种:①发射信号频率在脉冲内随时间线性变化的线性调频(LFM)脉冲压缩雷达;②为弥补线性调频脉冲压缩雷达不足而提出的非线性调频(NLFM)脉冲压缩雷达;③基于二相制、多相制及巴克码、伪随机等类型的相位编码(PSK)脉冲压缩雷达。这些脉冲压缩雷达优缺点各异,都是目前常见的脉冲压缩雷达技术^[49]。

早在1999年,西安电子科技大学的保铮等^[50]提出基于频带分割的方法实现超宽带雷达的脉冲压缩过程,解决了对超宽带脉冲压缩回波信号数据的高速采集问题;在这之后,电子科技大学^[50-52]对超宽带脉压雷达信号产生、数字信号处理等方面开展了深入研究;近年来,国内包括电子科技大学、国防科学技术大学、太原理工大学等^[53-55]多家科研单位在超宽带脉冲压缩雷达方面进行了深入研究,取得了较多的科研成果。

1.5 超宽带脉冲压缩雷达的问题

1.5.1 探测盲区问题的存在

采用大时宽-带宽积的超宽带信号作为发射信号^[56],确实能够在保证超宽带脉冲雷达系统获得高分辨率的同时,增加其探测深度,提高其探测性能。但随着脉压系数(pulse compression coefficient)的不断增加,所采用的大时宽-带宽积发射信号的时宽也会随之不断增加;不断增加的时宽会导致超宽带脉冲压缩雷达体系的探测盲区随之不断增加,对于超宽带穿墙雷达系统,高精度的近距离目标正是其所关心的探测区域,因此,如何减小因脉冲压缩技术应用于超宽带穿墙雷达系统中带来的盲区增大显得极为必要^[57]。第4章将对该问题展开深入探讨。

1.5.2 组合调制信号的性能分析和减小探测盲区

无论脉冲压缩技术采用何种时限信号作为发射信号,单基站雷达盲区的增大都是不可避免的。由于盲区的大小取决于信号的时宽,因此为了解决盲区的问题就必须利用窄脉冲对近处目标进行探测以达到补盲的目的,这也是目前最为常见的方法。但是对于单基站雷达,发射窄脉冲需要额外的发射设备,这样会极大地增加雷达系统的复杂度。1.5.1节指出,可以利用组合脉冲的方法来解决超宽带雷达盲区的问题,但是利用这种方法需要雷达发射机发射不同调制宽度的编码信号,对发射机部分的负荷较大,同样在接收机部分,需要对长短调制脉冲分别进行匹配滤波。因此,后续章节提出在不过度增加系统复杂度的基础上,实现短脉冲补盲。

1.5.3 脉冲压缩雷达距离旁瓣抑制技术

脉冲压缩技术的优势使其被广泛运用于雷达系统,但是脉冲压缩仍然存在目前技术无法完全克服的缺陷。无论是线性调频信号还是相位编码信号,通过匹配滤波器后,在获得所需要的窄脉冲的同时,不可避免地在此窄脉冲(主瓣)两侧出现幅度低于窄脉冲的一系列距离旁瓣。距离旁瓣的存在不仅降低邻近目标的分辨率,同时强目标回波信号的旁瓣会掩盖弱目标回波信号,降低小信号检测能力并造成虚警率上升。因此,脉冲压缩处理的关键技术之一就是旁瓣抑制。常用的旁瓣抑制方法除了典型的窗函数外,还有最小二乘(least square, LS)法^[58]、CLEAN 算法^[59]等,这些算法都能在一定程度上消除距离旁瓣的影响,但是对弱小目标的提取效果十分有限。2003 年,Blunt^[60,61]提出了通过最小均方误差(minimum mean square error, MMSE)准则的自适应处理来实现脉冲压缩技术,该方法利用先验目标距离信息来实现自适应地抑制距离旁瓣。其后,张劲东等^[62,63]在基于 MMSE 算法的脉冲压缩技术中加入了迭代思想,使得旁瓣抑制效果更加明显。张朝霞等^[64]基于卡尔曼-最小均方误差(K-MMSE)准则的雷达旁瓣抑制进行研究及仿真,取得了很好的效果。近年来,关于距离旁瓣抑制的问题,仍然有许多研究小组提出新的算法,如通过优化子脉冲初相编码、盲速旁瓣抑制等方法^[65-68],都达到了不错的效果。第 5 章将对该问题展开深入探讨。

1.6 混沌雷达的发展

20 世纪 60 年代以来,国内外学者在噪声雷达领域均取得了很多研究成果。由于噪声雷达的噪声源是随机序列,存在不易产生和难以控制等缺点,因此部分学者不得不将注意力转向伪随机序列,而混沌就是一种应用前景较广的伪随机序列。它是一种随机的物理现象,尽管有作用距离有限和匹配滤波困难等因素的限制,但其同时具有随机序列的特性,即白噪声统计特性、较理想的自相关和互相关特性及产生简单、抗干扰能力强、初值敏感、非周期和不可预测等特性。

麦克马斯特大学的 Haykin 等^[69]在研究海杂波的分形维时,发现海杂波的混沌动力学特性,为混沌理论在雷达领域的应用研究奠定了基础。接着,Matsumoto^[70]在蔡氏电路中发现了混沌吸引子,引起了人们利用混沌动力学生成伪随机码的兴趣^[71]。

1993~1995 年,英国的 Hudson 和 Parthasarathy^[72-74]持续针对利用映射来描述一个量子种群中变化的包络数进行了研究,详细推导了映射混沌的产生过程。

2002 年,美国的 Flores 等^[75]利用映射混沌信号调制雷达信号,并将其用于宽带雷达成像,指出信号的自相关在没有多普勒频移的情况下,具有非常好的距离

分辨率;2003年,Flores等^[76]又将整个距离-多普勒域上随机频率调制信号用于宽带雷达成像的分析,评估了它们在距离-多普勒域上的精度限制和旁瓣分布情况,并且分别从理论上和实验上证明,基于混沌的调频信号具有遍历性、平稳性,但不一定具有混沌特性。

2007年,加拿大的Ashtari等^[77,78]提出将混沌序列用于调制正弦波信号,于2008年着重分析了在混沌映射用于频率调制后的雷达信号仍然能保持混沌特性的充分条件,衡量的主要依据就是Lyapunov指数。他们指出基于混沌的调频信号相较于高斯序列调频的信号具有更好的距离分辨率,虽然和均匀分布序列的调频信号具有相当的距离分辨率,但混沌序列的产生却更加的容易和便捷。

2011年,Farshchi和Ebrahimi^[79]基于超混沌映射提出一种数据加密算法。2015年,印度的Bora等^[80]基于互混沌映射提出一种彩色图像加密算法,大大提高了保密性。

国内学者Chua^[70]于1984年首先研究了二阶数字滤波器中的混沌现象,蔡氏电路图如图1-1所示。其中, C_1 、 C_2 为两个线性电容, L 为线性电感, R_C 为线性电阻, R 则为一非线性电阻,也就是蔡氏二极管。蔡氏电路简单,却能够表现出混沌行为,这使得此电路被称为“混沌电路的典范”。

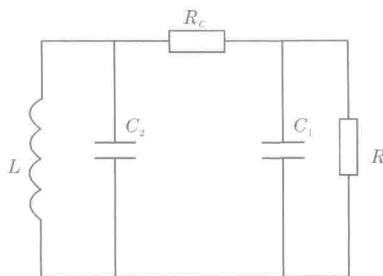


图 1-1 蔡氏电路

1998年,电子科技大学的袁永斌^[81]研究了 Tent 一维函数迭代型混沌序列产生混沌雷达波形的方法,从理论上推导了混沌连续雷达波形和截断混沌序列调制的单载频矩形脉冲雷达波形的模糊函数表达式。然而,由混沌映射调整的雷达信号相关性能并不那么理想,陈滨等^[82]于2008年提出了多段分段线性(MSPL)混沌系统,以提高信号的相关性能。

同年,中国科学院电子研究所邓云凯^[83]及其研究团队提出脉内混沌调相-脉间随机编码的 SAR 信号,并选择超混沌 Logistic 相位编码作为发射信号,极大地提高了保密性和抗干扰能力;同时提出利用混沌相位编码进行反欺骗方式干扰,仿真实验证实了混沌二相码具有反欺骗干扰的性能^[84];另外,他们还对数字式实现线性调频信号进行了研究^[85],但是没有考虑混沌序列实现时可能存在的问题。

一般在利用直接数字式频率合成器时,有限字长是 14 位,因此产生的混沌映射的最长周期将不超过 2 的 14 次方。因此,当需要的混沌序列较长时,产生的混沌序列具有周期性。2013 年,中国科学院的杨启伦等^[86]提出利用组合混沌映射来产生周期序列更长的混沌序列,混沌维数接近无限维,解决了 14 位字长的限制。

2011 年以来,国防科学技术大学的杨进等^[87-89]分析了基于混沌序列的频率和相位调制后的信号的混沌行为,得出混沌映射的相空间结构被频率或者相位调制破坏,直接引起了混沌调制后的信号的不确定行为;还分析了混沌映射用于调制后的信号仍然能够保持混沌特性的所需条件,给出不是任意的混沌映射都适用于雷达信号调制的结论;同时指出由于混沌具有类随机特性、初值敏感性及易于产生和控制等特点,结合工程上步进信号,得到一种基于混沌序列的随机频率步进雷达信号^[90]。2013 年,针对混沌映射相空间的强结构,截获后容易被重构的问题,杨进等^[91]又提出一种采样混沌序列,用来弱化映射的相空间,但也没有将信号真正地应用于现实中的目标检测。

利用激光器产生混沌的应用也很广泛,2003 年,日本的 Imai 等^[92]对掺铒光纤激光器产生混沌的同步特性进行了分析和研究。2005 年,南京晓庄学院的颜森林^[93]提出光纤混沌双向保密通信设想;2009 年,颜森林^[94]又对外部光注入半导体激光器的非线性物理特性分岔和周期性进行了深入研究。2010 年,巴基斯坦的 Ali^[95]及其研究团队对掺铒光纤激光器中改变参数对产生和增强混沌的影响进行了研究。太原理工大学的孟丽娜^[96]将得到的超宽带微波混沌信号应用于光纤通信;2015 年,王文琦等^[97]直接将混沌应用于超宽带雷达成像。然而,激光器产生混沌时由于腔长而始终存在时延信号(或者称为周期性),2012 年,西南交通大学的李念强等^[98]尝试消除激光器产生混沌时的时延信号,但是很多参数的选择范围很固定;2015 年,他们采用三级垂直腔去隐藏混沌的时延信号^[99],但是结构比较复杂。这些研究没有将光生混沌应用于宽带雷达的信号调频,使得光生混沌的应用存在局限性。

1.7 宽带混沌雷达信号设计与研究

第 6 章首先针对一维混沌映射序列存在相空间简单、平衡性差、近似熵低及数字实现时容易被短量化字长破坏结构等缺点,提出一种基于 Bernoulli 的组合混沌映射模型,利用其他一维映射产生 Bernoulli 映射的 B 参数,再将参数序列代入 Bernoulli 映射产生混沌。结果表明,该模型相较于一维映射混沌、基于 Logistic 的组合映射混沌及 Bernoulli 与自身的组合映射混沌,具有更复杂的相空间、更低的平衡值、更高的近似熵,在量化字长较短的数字器件中实现混沌时,也能保持良好的混沌特性。

随后,针对光纤激光器因腔长的存在而使得产生的混沌序列具有较强周期性的问题,提出采样方法和重组方法,对原始混沌序列进行不同间隔的采样或者重组,在不同程度上改变产生混沌的机制。

最后,设计了混沌调频的雷达信号,同时推导和分析了信号的频谱和模糊函数。

1.8 认知雷达的概念

随着现代信息化程度的不断提高,军事技术的发展对现代雷达的要求也越来越高。目标多样化、环境复杂化和任务多元化,也促进了雷达体制、雷达理论和雷达技术的不断发展。为了提高雷达的生存能力、隐蔽性、低截获率、抗干扰性和反隐身性能,以适应更复杂的环境和获得更高的数据率,实现对目标的探测、追踪、识别及定位,现代雷达正在向多功能、网络化、智能化的方向发展。

通常,传统雷达发射和接收信号的波形参数都是固定的,虽然通过接收端的自适应处理及滤波方法的设计可以提高雷达系统的性能,但是发射固定参数的波形,一旦雷达的应用环境发生变化,仅依靠接收端的相关信号处理就无法得到理想的探测和跟踪效果。与此同时,集成电路工程的快速发展和现代数字技术的不断进步为直接数字合成产生合成波形奠定了良好的基础,也就是说当前的硬件技术为实现雷达系统发射端的自适应处理提供了良好的基础。在这样的背景下,一种智能化的新体制雷达系统——认知雷达^[100](cognitive radar, CR)的提出,指明了现代雷达的智能化发展趋势,其基本结构如图 1-2 所示。它是一种可以利用所感知的目标和外部环境信息及其他先验知识,智能地选择发射信号、工作方式和系统配置的智能化雷达系统。由于它的智能化能够适应越来越复杂的战场环境和日益拥挤的无线电环境,因此得到了极大关注和广泛研究。

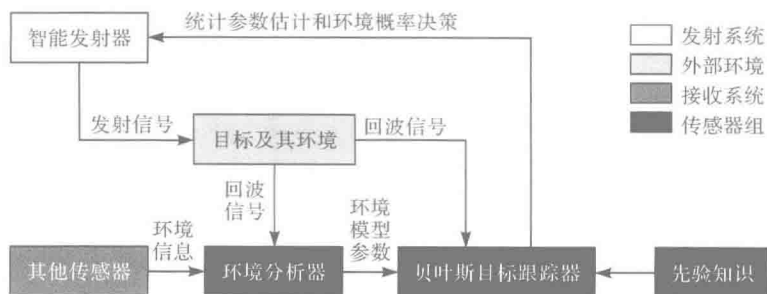


图 1-2 认知雷达原理图

由认知雷达的原理图(图 1-2)可以看出,与传统雷达相比,认知雷达具有以下