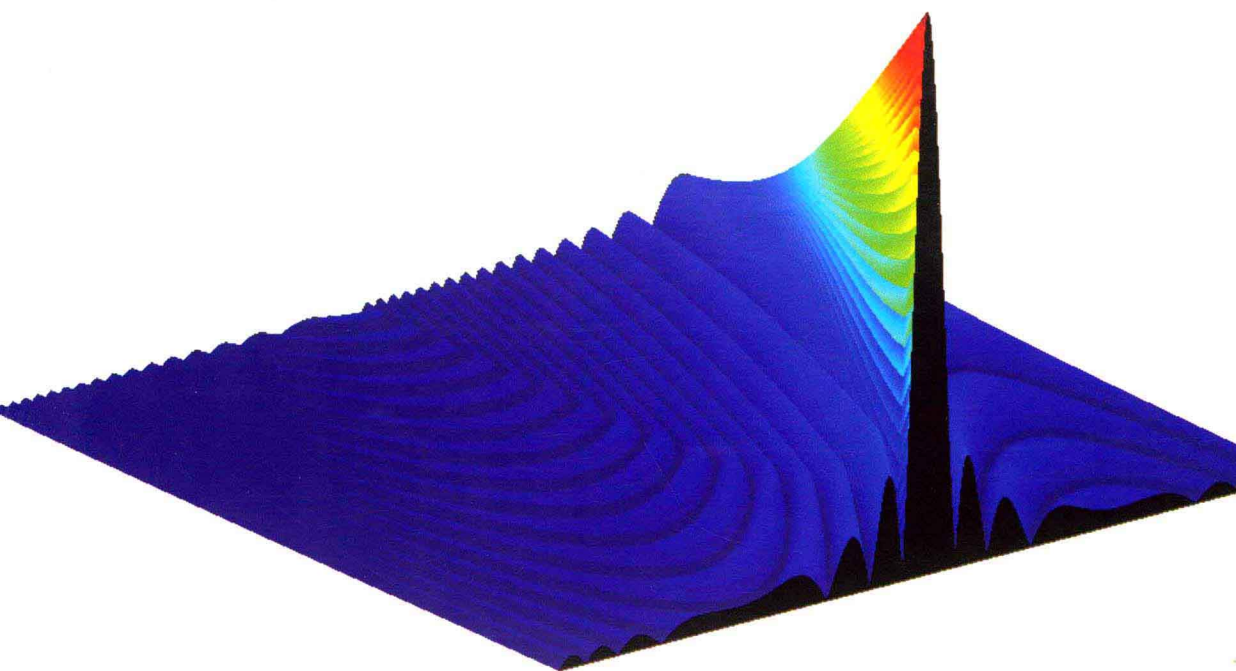


雷达信号分析与处理

Radar Signal Analysis and Processing

朱晓华 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

雷达信号分析与处理

Radar Signal Analysis and Processing

朱晓华 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

雷达信号分析与处理 / 朱晓华编著. —北京:国防工业出版社,2011.9

雷达专业系列教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 07621 - 9

I. ①雷... II. ①朱... III. ①雷达信号 - 信号分析 - 高等学校 - 教材②雷达信号处理 - 高等学校 - 教材 IV. ①TN957.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 178474 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 18¼ 字数 413 千字

2011 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 36.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

雷达的类型是多种多样的,不同用途和功能的雷达所采用的信号形式和需要获取的信息内容各不相同。雷达的信号形式不仅决定了雷达的体制与信号处理方法,而且直接影响雷达系统的分辨力、测量精度以及抑制杂波能力等潜在性能。波形设计就成了雷达系统最佳综合的重要内容,逐渐形成雷达理论的重要分支。本书主要针对从事雷达系统分析、信号处理和波形设计等方面工作的科研人员,以及高等学校电子信息工程、雷达工程和其它相关专业的高年级本科生、研究生与教师,重点介绍雷达信号分析与处理的相关内容,希望本书的出版能对他们有所帮助。

本书从内容上讲可概括为四个部分:第一部分为信号分析与处理方面的基础知识,包括第一章和第二章,主要介绍了信号的傅里叶分析方法、雷达信号与线性处理系统和数字信号处理基础。第二部分包括第三章和第四章,系统阐述雷达测量精确度和雷达分辨理论,介绍模糊函数及其主要性质,系统分析了雷达信号的模糊函数及其主要参数对系统潜在性能(诸如分辨力、测量精度、模糊度和杂波抑制能力等)的影响。第三部分为典型雷达信号的分析与处理,包括第五章至第八章,给出调频脉冲信号、相位编码脉冲信号、相参脉冲串信号和随机信号的频谱、模糊函数和匹配滤波器频率特性,分析各种信号模糊图的特点及其适用场合,讨论各种信号的性能和处理方法。第四部分为雷达波形选择和波形设计的基本方法,包括按自相关函数设计波形、抑制杂波波形设计以及从目标分辨要求设计波形的的基本方法。

本书比较侧重基本理论、基本概念和基本方法的叙述,内容安排力求深入浅出,通俗易懂。在数学推导上尽量做到详尽,力求准确,但不过分追求数学上的严密性,有些地方从实际应用出发采用了近似计算方法。书后附有参考文献目录,便于读者对有关问题进行深入地钻研。

本书是在“雷达信号分析”讲义基础上,根据作者多年的教学与科研实践经验,参考了国内外大量文献资料编写而成,在此特向贾鸿志教授和有关作者表示诚挚的感谢!在编写过程中,顾红教授和苏卫民教授提出了许多宝贵意见,顾陈博士,王克让、柏磊、贺亚鹏、庄珊娜、张燕洪博士研究生和侯亚丽、周文霞、曾建硕士研究生在绘图、编排、校订等方面做了大量工作,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中不可避免还存在一些疏漏和错误,殷切希望广大读者批评指正。

作者
2011年5月

目 录

第一章 绪论	1
第二章 信号分析与处理基础	4
2.1 信号的傅里叶分析方法	4
2.1.1 傅里叶变换	4
2.1.2 傅里叶变换的主要性质	5
2.1.3 δ 函数(或单位脉冲函数)	8
2.1.4 周期重复 δ 函数的傅里叶变换	12
2.2 雷达信号与线性处理系统	14
2.2.1 雷达信号的复数表示	14
2.2.2 雷达信号的相关特性	18
2.2.3 线性带通系统	23
2.2.4 最佳线性滤波器	26
2.2.5 有色噪声情况下的最佳线性滤波器	33
2.2.6 “点目标”回波的数学模型	34
2.2.7 正交相位检波器	36
2.3 数字信号处理基础	38
2.3.1 采样定理	38
2.3.2 雷达信号数字化	40
第三章 雷达测量精度和分辨力	46
3.1 概述	46
3.2 雷达测距精度	46
3.3 雷达测速精度	52
3.4 信号的非线性相位特性对测量精度的影响	53
3.5 雷达不定原理	56
3.6 距离分辨力	59
3.6.1 距离分辨力与距离自相关函数	59
3.6.2 距离自相关函数的变化规律对距离分辨力的影响	61
3.6.3 距离自相关函数和匹配滤波器输出响应的关系	61
3.6.4 衡量分辨力的波形参量	62
3.7 速度分辨力	70
第四章 模糊函数	74
4.1 模糊函数的定义	74

4.1.1	模糊函数的推导	74
4.1.2	模糊函数的其它表示法	76
4.2	模糊函数与分辨力的关系	78
4.2.1	模糊函数的图形	78
4.2.2	模糊函数与二维分辨力的关系	80
4.2.3	模糊函数与一维分辨力的关系	81
4.3	模糊函数与匹配滤波器输出响应的关系	82
4.4	模糊函数的主要性质	86
4.4.1	模糊函数本身的性质	86
4.4.2	模糊函数的变换关系	90
4.5	模糊图的切割	95
4.6	模糊函数与精度的关系	98
4.7	利用模糊函数对典型脉冲雷达信号进行分析	102
第五章	调频脉冲信号	108
5.1	概述	108
5.2	线性调频脉冲信号的产生	109
5.3	线性调频脉冲信号的频谱	112
5.4	线性调频脉冲信号的波形参量	115
5.5	线性调频脉冲信号的模糊函数	116
5.5.1	模糊函数与模糊图	116
5.5.2	模糊图的切割	118
5.6	线性调频脉冲信号的性能	121
5.7	线性调频脉冲信号的处理方法	126
5.7.1	近似匹配滤波器的实现	126
5.7.2	近似匹配滤波器的输出	127
5.7.3	线性调频脉冲信号的数字处理方法	129
5.8	线性调频脉冲信号的加权处理	133
5.8.1	频域幅度加权处理	134
5.8.2	加权性能分析	136
5.9	非线性调频脉冲信号	140
5.10	V型调频脉冲信号	143
5.10.1	V型调频脉冲信号的频谱	144
5.10.2	V型调频脉冲信号的模糊函数	145
5.10.3	V型调频脉冲信号的匹配滤波器	150
第六章	相位编码信号	151
6.1	概述	151
6.2	二相编码信号	152
6.2.1	基本概念	152
6.2.2	二相编码信号的频谱	153

6.2.3	二相编码信号的模糊函数	155
6.3	二元伪随机序列	159
6.3.1	M 序列	159
6.3.2	L 序列	166
6.3.3	巴克序列	168
6.4	二相编码信号的处理	179
6.4.1	匹配滤波器特性	179
6.4.2	匹配滤波器的结构	180
6.4.3	二相编码信号的数字处理方法	183
6.5	二相编码信号脉冲压缩的旁瓣抑制	183
6.6	多相编码信号	188
6.6.1	法兰克多相码	188
6.6.2	泰勒四相码	190
第七章	相参脉冲串信号	194
7.1	概述	194
7.2	均匀脉冲串信号的频谱	195
7.3	均匀脉冲串信号的模糊函数	197
7.4	均匀脉冲串信号的性能	203
7.5	均匀脉冲串信号的处理方法	205
7.6	均匀脉冲串信号的加权处理	207
7.7	其它形式脉冲串信号	211
7.7.1	重复周期参差脉冲串信号	211
7.7.2	脉间二相编码脉冲串信号	214
7.7.3	步进频率脉冲串信号	217
第八章	随机信号	228
8.1	概述	228
8.2	随机调频连续波雷达信号	228
8.2.1	随机调频连续波雷达信号的平均模糊函数	228
8.2.2	随机调频连续波雷达信号的频谱	231
8.2.3	复合随机调频连续波雷达信号的频谱	232
8.3	随机二相编码脉冲串信号	233
8.4	随机二相编码连续波信号	239
8.5	随机脉位调制脉冲串信号	240
8.6	随机脉位与随机二相码调相复合脉冲串信号	246
第九章	波形设计的基本方法	250
9.1	概述	250
9.2	按给定的 $\chi(\tau, 0)$ 进行波形设计	251
9.2.1	设计方法	251
9.2.2	逗留相位原理	252

9.2.3	用“逗留相位原理”,按 $\chi(\tau,0)$ 进行波形设计	253
9.3	抑制杂波的波形设计	257
9.3.1	杂波的数学模型及统计特性	257
9.3.2	杂波存在时波形设计的依据	258
9.3.3	Q 函数	262
9.3.4	在杂波情况下波形设计的途径	264
9.4	波形设计的简便方法	265
9.4.1	雷达信号按模糊函数分类	265
9.4.2	简易波形设计举例	266
参考文献		271

Contents

Chapter 1 Introduction	1
Chapter 2 Basis of Signal Analysis and Processing	4
2.1 Fourier Analysis Method of Signal	4
2.1.1 Fourier Transform	4
2.1.2 Main Properties of Fourier Transform	5
2.1.3 δ Function (Unit Impulse Function)	8
2.1.4 Fourier Transform for Repetition Period δ Function	12
2.2 Radar Signal and Linear Processing System	14
2.2.1 Complex Representation of Radar Signal	14
2.2.2 Correlation Properties of Radar Signal	18
2.2.3 Linear Bandpass System	23
2.2.4 Optimum Linear Filter	26
2.2.5 Optimum Linear Filter in Colored Noise Environment	33
2.2.6 Mathematical Model of Point Target Echoes	34
2.2.7 Quadrature Phase Detector	36
2.3 Basis of Digital Signal Processing	38
2.3.1 Sampling Theorem	38
2.3.2 Digitization of Radar Signal	40
Chapter 3 Measurement Accuracy and Resolution of Radar Signal	46
3.1 Introduction	46
3.2 Ranger Measurement Accuracy of Radar	46
3.3 Velocity Measurement Accuracy of Radar	52
3.4 Influence of Signal Nonlinear Phase Characteristics on Measurement Accuracy	53
3.5 Radar Uncertainty Principle	56
3.6 Range Resolution	59
3.6.1 Range Resolution and Range Autocorrelation Function	59
3.6.2 Influence of Range Autocorrelation Function Variation on Range Resolution	61
3.6.3 Relation between Range Autocorrelation Function and Matched Filter Output Response	61
3.6.4 Waveform Parameters of Measure Resolution	62

3.7	Velocity Resolution	70
Chapter 4	Ambiguity Function	74
4.1	Definition of the Ambiguity Function	74
4.1.1	Derivation of the Ambiguity Function	74
4.1.2	Other Expressions of the Ambiguity Function	76
4.2	Relation between Ambiguity Function and Resolution	78
4.2.1	Graphics of Ambiguity Function	78
4.2.2	Relation between Ambiguity Function and Two-Dimension Resolution	80
4.2.3	Relation between Ambiguity Function and One-Dimension Resolution	81
4.3	Relation between Ambiguity Function and Matched Filter Output Response ...	82
4.4	Main Properties of the Ambiguity Function	86
4.4.1	Own Properties of the Ambiguity Function	86
4.4.2	Transform Relations of the Ambiguity Function	90
4.5	Cuts through the Ambiguity Function	95
4.6	Relation between Ambiguity Function and Measurement Accuracy	98
4.7	Analysis on Typical Pulse Radar Signal with Ambiguity Function	102
Chapter 5	Frequency Modulated Pulse Signal	108
5.1	Introduction	108
5.2	Production of Linear Frequency Modulated Pulse Signal	109
5.3	Frequency Spectrum of Linear Frequency Modulated Pulse Signal	112
5.4	Waveform Parameters of Linear Frequency Modulated Pulse Signal	115
5.5	Ambiguity Function of Linear Frequency Modulated Pulse Signal	116
5.5.1	Ambiguity Function and Ambiguity Diagram	116
5.5.2	Cuts through the Ambiguity Function	118
5.6	Performance of Linear Frequency Modulated Pulse Signal	121
5.7	Processing Methods for Linear Frequency-Modulated Pulse Signal	126
5.7.1	Implementation of Approximation Matched Filter	126
5.7.2	Output of Approximation Matched Filter	127
5.7.3	Digital Processing Method for Linear Frequency Modulated Pulse Signal	129
5.8	Weighted Processing for Linear Frequency Modulated Pulse Signal	133
5.8.1	Amplitude Weighted Processing in Frequency Domain	134
5.8.2	Performance Analysis of Weighting	136
5.9	Nonlinear Frequency Modulated Pulse Signal	140
5.10	V-Shape Frequency Modulated Pulse Signal	143
5.10.1	Frequency Spectrum of V-Shape Frequency Modulated Pulse Signal	144

5. 10. 2	Ambiguity Function of V-Shape Frequency Modulated Pulse Signal	145
5. 10. 3	Matched Filter of V-Shape Frequency Modulated Pulse Signal	150
Chapter 6	Phase Coded Pulse Signal	151
6. 1	Introduction	151
6. 2	Bi-phase Coded Signal	152
6. 2. 1	Primary Concept	152
6. 2. 2	Frequency Spectrum of Bi-phase Coded Signal	153
6. 2. 3	Ambiguity Function of Bi-phase Coded Signal	155
6. 3	Binary Pseudo-random Sequences	159
6. 3. 1	M Sequence	159
6. 3. 2	L Sequence	166
6. 3. 3	Barker Sequence	168
6. 4	Processing of Bi-phase Coded Signal	179
6. 4. 1	Characteristics of Matched Filter	179
6. 4. 2	Structure of Matched Filter	180
6. 4. 3	Digital Processing for Bi-phase Coded Signal	183
6. 5	Sidelobe Suppression for Bi-phase Coded Signal Pulse Compression	183
6. 6	Polyphase Coded Signal	188
6. 6. 1	Frank Polyphase Code	188
6. 6. 2	Taylor Four-phase Code	190
Chapter 7	Coherent Pulse Train Signal	194
7. 1	Introduction	194
7. 2	Frequency Spectrum of Uniform Pulse Train Signal	195
7. 3	Ambiguity Function of Uniform Pulse Train Signal	197
7. 4	Performance of Uniform Pulse Train Signal	203
7. 5	Processing Methods for Uniform Pulse Train Signal	205
7. 6	Weighted Processing for Uniform Pulse Train Signal	207
7. 7	Other Forms of Pulse Train Signal	211
7. 7. 1	Staggered Repetition Pulse Train Signal	211
7. 7. 2	Inter-pulse Bi-phase Coded Pulse Train Signal	214
7. 7. 3	Stepped-frequency Pulse Train Signal	217
Chapter 8	Random Signal	228
8. 1	Introduction	228
8. 2	Random Frequency Modulated Continuous Wave Radar Signal	228
8. 2. 1	Average Ambiguity Function of Random Frequency Modulated Continuous Wave Radar Signal	228
8. 2. 2	Frequency Spectrum of Random Frequency Modulated Continuous Wave Radar Signal	231

8. 2. 3	Frequency Spectrum of Compound Random Frequency Modulated Continuous Wave Radar Signal	232
8. 3	Random Bi-phase Coded Pulse Train Signal	233
8. 4	Random Bi-phase Continuous-wave Signal	239
8. 5	Random Pulse-position-modulated Pulse Train Signal	240
8. 6	Compound Pulse Train Signal of Random Pulse-position-modulated Pulse and Random Bi-phase Coded Phase Pulse	246
Chapter 9	Basic Methods of Waveform Design	250
9. 1	Introduction	250
9. 2	Waveform Design According to a Given $\chi(\tau, 0)$	251
9. 2. 1	Methods of Design	251
9. 2. 2	Principle of Stationary Phase	252
9. 2. 3	Waveform Design According to a Given $\chi(\tau, 0)$ with Principle of Stationary Phase	253
9. 3	Waveform Design with Clutter Suppression	257
9. 3. 1	Mathematical Model and Statistic Characteristics of Clutters	257
9. 3. 2	Foundation of Waveform Design in Clutter Environment	258
9. 3. 3	Q Function	262
9. 3. 4	Methods of Waveform Design in Clutter Environment	264
9. 4	Simple Methods of Waveform Design	265
9. 4. 1	Classification of Radar Signals by Ambiguity Function	265
9. 4. 2	Simple Example of Waveform Design	266
References	271

第一章 绪 论

雷达发射的信号与通信机发射的信号有本质区别,雷达发射的信号本身不包含任何信息,它只是信息的运载工具。当雷达发射的信号碰到目标后,目标就对这个信号进行调制,并将其反射(这个反射信号通常称为回波),此时目标的全部信息就蕴藏在这个回波中。显然,雷达信息传输过程也会受到各种外界(自然和人为的)干扰和内部噪声干扰。为了提高干扰环境中信号检测的能力,必须基于对各种干扰环境所获得的统计知识进行信号处理,必须对雷达发射的信号进行波形设计与选择,进而设计与之匹配的信号处理系统。所以雷达信号处理的基础理论是建立在信号检测理论和雷达波形设计之上的。雷达信号处理的目的是通过对回波信号的加工,消除或降低各种各样的干扰、噪声及由这些干扰、噪声引起的不确定性,以易于提取所需信息和提高信息的质量。可提取的信息和信息的质量除与处理系统有关外,还与雷达发射的信号形式有直接关系。因此,研究和分析雷达信号是很重要的。

1943年诺思(North)提出匹配滤波器理论,大大推动了雷达检测能力的提高。1950年伍德沃德(Woodward)把香农(Shannon)基础信息论推广应用于雷达信号检测,稍后出现了基于统计判决的许多最佳准则检测方法,它们标志着经典雷达信号检测理论的形成。伍德沃德不仅在发展雷达信号检测理论上做出了很大的贡献,而且在《概率论和信息论在雷达中的应用》著作中提出了著名的雷达模糊原理,定义了模糊函数及分辨常数等新概念,奠定了雷达分辨理论的基础,首次建立了波形设计思想,指出距离分辨力和测距精度取决于信号的带宽而非时宽,从而大大推动了雷达信号研究工作的发 展,也为雷达信号处理奠定了基础。模糊函数描述了雷达信号的分辨力、模糊度、测量精度和抑制杂波能力等特性,这个函数直到现在仍是研究、分析、设计雷达信号的主要数学工具。

早期雷达所采用的信号是最简单的恒定载频矩形脉冲信号,这种信号用于雷达后,测距精度和距离分辨力同测速精度和速度距离分辨力以及作用距离之间存在着不可克服的矛盾。为了解决这个矛盾,也为了反雷达侦察的需要,人们开始研究复杂调制的雷达信号。最早获得实际应用的是线性调频脉冲压缩信号,随后相继出现了频率编码、非线性调频、相位编码和相参脉冲串等大时宽带宽信号,后来又出现了线性调频连续波、步进频率脉冲串和脉间相位编码脉冲串等复杂调制大时宽带宽信号。

现代雷达所面临的环境日趋复杂,对雷达发射的信号形式要求具备低截获概率、良好的抗干扰(ECCM)性能和电磁兼容能力(EMC),人们开始研究随机信号。随机信号雷达作为一种新型的雷达体制,一经问世就一直为人们所关注,有关这方面的研究报告层出不穷。随机信号雷达采用的是微波的随机信号或者是低频随机信号调制的载波信号。由于这种信号是非周期的随机信号,所以消除了测量目标距离和速度的不定度。因而随机信号雷达在目标发现能力、测量参数的精确度、分辨力、抗干扰能力及电磁兼容能力等方面

均是理想的。

功率放大链与可产生和处理复杂调制信号的特殊器件(如超声波延迟器件、电荷耦合器件等)的研制成功,特别是数字技术(如 DDS、DSP、FPGA 等)在雷达中的广泛应用,为采用这些复杂调制的发射波形创造了条件。

现代雷达面临着低空/超低空突防、反辐射导弹(RAM)、综合电子干扰(ECM)和隐身目标的四大威胁。为了对付这四大威胁,确保雷达生存与战斗能力,涌现出许多具备“高灵敏、抗截获、多功能、自适应”特点的先进、新颖的雷达技术乃至雷达体制,诸如相控阵雷达、多基地雷达、超视距雷达、合成孔径与逆合成孔径成像雷达、宽带/超宽带雷达、低截获概率(LPI)雷达、MIMO 雷达和雷达组网技术、极化捷变/分集技术、综合 ECCM 技术、雷达目标识别技术等。这些雷达新体制、新技术的应用极大地扩展了雷达系统对目标和环境的信息获取能力以及对复杂环境的适应能力,为雷达信息的深入发掘和利用、提高雷达系统智能化水平奠定了良好的基础。这些雷达新体制、新技术的设计均需借助于数字技术,它们都直接或间接依赖于雷达波形设计和雷达信号处理技术。

雷达的波形设计主要从模糊函数的角度出发研究如何选择与目标和环境最匹配的波形。基于模糊函数的波形设计一般有两种途径:一种是直接按照模糊函数进行设计。通过模糊函数最优综合的方法,得到所需要的最优波形。根据二维模糊函数直接进行波形设计在数学上遇到了困难,而且综合得到的复杂调制波形,也往往是技术上难以实现的信号。不过一维模糊函数的综合借助于相位逗留原理获得了较好的解决。另一种是里海涅克(Rihaczek)提出的“简便的波形选择途径”,它兼顾了技术实现的难易程度和造价成本,选择合适的信号形式和波形参数,使系统的性能指标满足要求。因此,简便波形选择成为最常用的方法。随着宽带/超宽带雷达迈入实用阶段,目标不再以单个点目标作为模型,目标多散射中心的出现使得传统的雷达波形设计、目标检测和识别方式发生了改变。对一部具有合适的带宽、能够分辨目标上各单个散射点的高分辨力雷达(HRR),可设计使其发射机和接收机与目标冲击响应相匹配,从而使 HRR 的检测性能与把目标看成是单一散射点的低分辨力雷达(LRR)相比可以得到改善。

现代雷达必须具备多功能和综合应用的能力。例如,要求一部雷达能够同时具备多目标搜索、截获、跟踪、识别及武器制导或火控等功能,要求雷达能与通信、指挥控制、电子战等构成综合体。因此,采用数字技术的多功能雷达大多采用多种发射信号形式,以适应不同的战术用途。随着电子战的发展,现代雷达面临的目标环境不仅复杂多端,而且是瞬息万变的,所以发射波形自适应是个值得重视的发展方向。

基于发射波形自适应的概念,目标的特性及外部环境信息以交互的方式获取,雷达可以在改变自身发射波形的基础上更好地获取信息,实现在目标特性及外部环境发生改变的时候,在检测、跟踪和抗干扰等方面的性能得到优化。与此同时,由于雷达采用发射波形自适应技术,大大降低了雷达波形被截获的可能性,使得电子侦察及干扰更为困难,甚至雷达可以通过自适应的方式避开电子干扰。发射波形自适应技术极大地增强了雷达系统对目标和环境的信息获取能力以及对复杂战场环境的适应能力,对于未来有效提高雷达性能和生存能力有着重要的理论和实际意义。

目前雷达系统的自适应功能基本局限于雷达接收系统,雷达发射系统的自适应功能理论研究还处于起步阶段。但在工程研究方面,现代数字技术和超大规模集成电路技术

的发展为直接数字合成产生合成波形奠定了基础。数字方法生成的波形具有严格的相干性、可重复性、高度的稳定性和可编程的优点,能够方便地实现波形参数捷变和任意复杂波形,满足了现代电子战环境中对雷达抗干扰和强生存能力的迫切要求,因此当前的硬件技术水平为实现雷达系统发射自适应功能提供了良好的基础。此外,发射波形自适应雷达系统和认知雷达系统的概念提出,也使雷达界认识到未来雷达的发展与雷达信号理论的发展是密不可分的。

第二章 信号分析与处理基础

2.1 信号的傅里叶分析方法

我们在研究、分析、处理各种信号或研究、分析各种信号的处理系统时,通常要知道信号或系统的两个特性,即时域特性和频域特性。这两个特性之间的关系就是大家熟知的傅里叶变换(Fourier Transform)。

傅里叶变换在现代雷达信号处理中占有很重要的地位。为便于后面的学习,简要回顾有关傅里叶变换的基本知识以及 δ 函数在分析信号时的应用。

2.1.1 傅里叶变换

傅里叶正、反变换的定义分别为

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.1)$$

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2.2)$$

式中, $s(t)$ 是以时间为变量的函数; $S(\omega)$ 是以频率为变量的函数。

上面两个定义也可写成对称形式,即

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.3)$$

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) e^{j2\pi ft} df \quad (2.4)$$

$S(\omega)$ 或 $S(f)$ 存在的充分条件是 $s(t)$ 绝对可积,即

$$\int_{-\infty}^{\infty} |s(t)| dt < \infty$$

但这个条件不是傅里叶变换存在的必要条件。例如,函数 $\sin(2\pi ft)$ 、 $U(t)$ (单位阶跃函数) 就不是绝对可积的,但它们的傅里叶变换仍然存在。实际上能产生的时间函数,一般都能满足绝对可积的条件,因此都存在傅里叶变换。

在雷达工程术语中,时间函数 $s(t)$ 称为雷达信号的时间波形,频率函数 $S(\omega)$ 或 $S(f)$ 称为雷达信号的频谱密度或频谱。

今后为书写方便,采用符号

$$s(t) \leftrightarrow S(f)$$

表示信号 $s(t)$ 和其频谱 $S(f)$ 。用复数表示,即

$$s(t) = s_1(t) + js_2(t)$$

$$S(f) = R(f) + jX(f)$$

考虑到

$$e^{\pm j2\pi ft} = \cos(2\pi ft) \pm j\sin(2\pi ft)$$

根据式(2.3)和式(2.4),很容易得出信号 $s(t)$ 的实部和虚部的傅里叶变换及其反变换,即

$$s_1(t) = \int_{-\infty}^{\infty} [R(f) \cos(2\pi ft) - X(f) \sin(2\pi ft)] df \quad (2.5)$$

$$s_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} [X(f) \cos(2\pi ft) + R(f) \sin(2\pi ft)] df \quad (2.6)$$

$$R(f) = \int_{-\infty}^{\infty} [s_1(t) \cos(2\pi ft) + s_2(t) \sin(2\pi ft)] dt \quad (2.7)$$

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} [s_2(t) \cos(2\pi ft) - s_1(t) \sin(2\pi ft)] dt \quad (2.8)$$

若 $s(t)$ 是实信号,即 $s_2(t) = 0, s_1(t) = s(t)$,根据式(2.7)和式(2.8)可得

$$R(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cos(2\pi ft) dt$$

$$X(f) = - \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \sin(2\pi ft) dt$$

说明实信号频谱的实部是偶函数,虚部是奇函数,因此

$$S^*(f) = R(f) - jX(f) = R(-f) + jX(-f) = S(-f)$$

即实信号频谱的共轭是原频谱的负频率函数。

若 $s(t)$ 是实偶信号,即 $s(t) = s(-t)$,则

$$X(f) = - \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \sin(2\pi ft) dt = 0$$

因此

$$\begin{aligned} S(f) &= R(f) + jX(f) = R(f) = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cos(2\pi ft) dt = 2 \int_0^{\infty} s(t) \cos(2\pi ft) dt \end{aligned} \quad (2.9)$$

即实偶信号的频谱是实信号频谱的实部,也就是说,实偶信号的频谱是频率的偶函数。

若 $s(t)$ 是实奇信号,即 $-s(t) = s(-t)$,则

$$S(f) = R(f) + jX(f) = jX(f) = -j \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \sin(2\pi ft) dt \quad (2.10)$$

即实奇信号的频谱是实信号频谱的虚部,也就是说,实奇信号的频谱是频率的虚奇函数。上述结论在计算信号的傅里叶变换时很有用。

2.1.2 傅里叶变换的主要性质

在分析信号时,仅仅知道信号的正、反傅里叶变换关系是不够的,还要进一步找出两者之间的一些特定关系,这些特定关系就是傅里叶变换的性质。掌握这些性质后,当信号