宽带雷达信号产生技术

The Generating Technology of Wideband Radar Signals

费元春　苏广川
米红　杨明　程艳　编著

·北京·

需要全本请访问 www.ertongbook.com

图书在版编目(CIP)数据

宽带雷达信号产生技术/费元春等编著.—北京:国防工业出版社,2002.1

ISBN 7-118-02543-7

Ⅰ.宽... Ⅱ.费... Ⅲ.雷达信号-宽带信号编码-技术 Ⅳ.TN957.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 20390 号

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 7 180 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:18.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致　读　者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，原国防科工委于 1988 年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是：

1. 在国防科学技术领域中，学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖，内容具体、实用，对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著；密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作，负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金
第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植
顾　　问	黄　宁
主任委员	殷鹤龄
副主任委员	王　峰　张涵信　张又栋
秘　书　长	张又栋
副秘书长	崔士义　蔡　镭
委　　员 (按姓名笔画排序)	于景元　王小谟　甘茂治　冯允成 刘世参　杨星豪　李德毅　吴有生 何新贵　佟玉民　宋家树　张立同 张鸿元　陈火旺　侯正明　常显奇 崔尔杰　彭华良　韩祖南　舒长胜

需要全本请访问 www.ertongbook.com

前　言

雷达是对远距离目标进行无线电探测、定位、测轨和识别的电子设备,无论军用还是民用,都占据重要位置。雷达技术的迅速发展,促使雷达性能不断提高。就雷达信号产生而言,已由传统的模拟技术向数字技术方向发展。

雷达信号形式对目标参数的检测、估计精度、目标识别能力和抗干扰性能等都有着深刻的影响,是雷达总体设计中的重要内容之一。通常是根据雷达的不同用途、性能要求,确定雷达的体制,设计合适的发射信号波形,从技术上产生所需的雷达信号波形。早期的雷达只有连续波和普通脉冲信号(即矩形包络射频脉冲形式),技术虽然成熟,但目标参数的测量能力和精度受到限制,远不能适应现代电子战环境下对雷达发展的需求。

现代雷达面临着综合性电子干扰、反辐射导弹、低空和超低空突防以及目标隐身技术等四大威胁,这就要求现代雷达具有反地物、抗积极和消极干扰、反隐身和自身生存的能力,信号具有频率捷变、波形参数捷变和自适应跳频的能力。因此对雷达信号产生器提出了越来越高的要求,要求它具有宽频带、高稳定、快速跳变和输出任意波形的能力。

宽带、超宽带、高稳定雷达信号对提高现有雷达的性能以及研制新一代高性能雷达都具有非常重要的意义,它不仅增强雷达的反干扰能力,有效地对付反辐射导弹,而且由于其相对带宽和绝对带宽都比较宽,在雷达成像、雷达目标识别、雷达低仰角跟踪等方面都有重要的应用。它是新一代雷达的关键技术,具有广泛的军事应用和民用前景。

作者在十余年的教学和科研中,结合宽带、超宽带雷达信号产生的新方法,从事了短波、超短波、米波到微波波段宽带雷达信号波形产生的多项课题研究,开展了基于 DDS 信号波形产生技术的研究,取得了一些新成果,在此基础上,系统地总结成本书。书中介绍了宽带、超宽带雷达信号产生的新技术、新方法,并给出一些研究结果。

全书内容共分 6 章:

第 1 章是宽带雷达信号的理论分析。介绍了雷达信号波形的分类和增大带宽的方法,论述了宽带雷达信号波形设计的理论基础,包括多种宽带雷达信号的建模与分析,为宽带雷达信号的产生和软硬件设计提供了理论基础。

第 2 章介绍了雷达信号波形产生技术和直接数字合成(DDS)方法,综述了雷达信号波形产生技术发展概况,论述了 DDS 的工作原理和特点,在 DDS 频谱分析的基础上提出多种改善输出频谱的方法。

第 3 章介绍了信号波形产生的新技术。以 DDS 为核心,分析比较了 DDS 直接合成、DDS 倍频、DDS 上变频、DDS + PLL 频率扩展共四种技术方案,论述了它们实现的可行性与应用场合,讨论了 DDS 波形产生器的优化设计。

第 4 章介绍了宽带、超宽带雷达信号波形产生器的设计。鉴于目前 DDS 工作频带的限制,最高工作频率低,为了产生宽带雷达信号,采用了 DDS 激励锁相环(PPL)频率合成方案。优选当今国际上先进的 Q3236 芯片,介绍了它的组成及工作原理,在 DDS 激励下,Q3236 输出 1200～1650 MHz 信号,通过与 1 GHz 本振信号下变频,滤波后输出需要的 200～650 MHz 宽带、超宽带雷达信号波形。

第 5 章介绍了高速实时控制电路的设计。首先阐述高速控制电路方案及主要组成功能,介绍以 TMS320C31 为主芯片的高速控制电路、硬件结构框图及各功能电路模块的性能,给出微机控制的高速控制电路原理图。其次讨论了微机控制的高速控制电路软

件设计问题,给出 TMS320C31 控制主、子程序的流程图,读数据和数据处理子程序,高速控制电路系统软件。通过微机实现对 DDS、PLL 及波形参数的高速控制。

第 6 章讨论了宽带雷达信号波形产生软件的设计。第一部分讨论了信号波形产生程序的数据结构及其算法,其中包括线性调频矩形脉冲(Chirp)雷达信号、非线性调频雷达信号(正弦调频、二次函数调频等)、连续波雷达信号、单载频脉冲信号、Barker 码调频信号、M—序列、L—序列、高斯包络单载频信号等的建模与控制;第二部分是关于雷达信号波形库程序设计,介绍采用 Delphi 语言编写的可扩展的宽带、超宽带雷达信号波形库、软件系统框图及软件流程图、对 DDS 及 Q3236 的控制以及微机与硬件设备间的数据通信,最后给出系统软件中可控的参数、友好的控制界面及使用说明等。

作者感谢国防科技图书出版基金的资助,也感谢“宽带、超宽带雷达信号产生的研究”、“高稳定、高纯度频谱频率源”以及“短波、超短波、微波波段信号波形产生器”等项目以及西安电子科技大学雷达信号处理国防科技重点实验室的支持,由费元春教授任主编并拟定编写提纲、组织编写,由费元春、苏广川、米红、杨明、程艳等参加编写,全书由费元春统稿和最后定稿。

中国工程院院士、航天工业总公司科技委常委张履谦研究员,中国工程院院士、信息产业部南京第十四研究所总工张光义研究员审阅了全书内容,给予了热情鼓励和指导,并提出了许多宝贵意见,装备指挥技术学院陈世伟教授审阅了全书,提出了许多具体的修改意见,在此表示衷心感谢。在本书的编写过程中,课题组的老师和研究生们也给予了帮助,在此一并表示感谢。

由于编著者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

编著者

2001 年 1 月于北京

目　　录

第 1 章　宽带雷达信号的理论分析…… 1
1.1　雷达信号波形的分类及增大带宽的方法 …… 1
1.2　宽带雷达信号波形设计的理论基础 …… 3
1.2.1　雷达信号波形—信号检测—匹配滤波 …… 3
1.2.2　信号形式与目标参数(R,v)的估计 …… 4
1.2.3　雷达分辨率与信号波形 …… 5
1.2.4　大时宽带宽乘积信号——脉冲压缩…… 10
1.2.5　信号形式与雷达“四抗”的关系…… 11
1.3　雷达信号波形设计的原则…… 13
1.3.1　波形设计的一般方法…… 13
1.3.2　波形设计要解决的问题…… 13
1.3.3　雷达信号参数之间的互相制约关系…… 14
1.4　几种典型宽带雷达信号…… 15
1.4.1　具有正刀刃形模糊图的雷达信号…… 15
1.4.2　具有图钉形模糊图的雷达信号…… 16
1.4.3　具有剪切刀形模糊图的雷达信号…… 18
1.4.4　具有钉床形模糊图的雷达信号…… 21
1.4.5　几种特殊体制雷达信号…… 25
第 2 章　雷达信号波形产生技术与直接数字合成 …… 28
2.1　雷达信号波形产生技术的发展概况…… 28
2.1.1　脉冲雷达与连续波雷达(或调频连续波雷达)信号 …… 28
2.1.2　线性调频信号的产生和发展…… 30
2.1.3　直接数字合成复杂波形…… 33

2.2 DDS的工作原理和特点 …… 34
2.2.1 DDS的工作原理 …… 35
2.2.2 DDS的特点 …… 37
2.3 DDS的输出信号频谱特性分析 …… 41
2.3.1 理想参数波形输出DDS的输出信号频谱分析 … 41
2.3.2 实际参数波形输出DDS的输出信号频谱分析 … 44
2.4 提高DDS的频谱纯度 …… 49
2.5 低杂散DDS芯片的设计考虑 …… 53
2.5.1 波形存储器的设计…… 53
2.5.2 优化相位累加器有效输出…… 56
2.5.3 数模转换器(DAC)的选择…… 59
第3章 宽带雷达信号波形产生的新技术 …… 63
3.1 用DDS直接产生宽带雷达信号 …… 63
3.2 采用DDS+倍频扩展频带 …… 66
3.2.1 倍频原理…… 66
3.2.2 DDS+倍频扩展频率的方案…… 69
3.2.3 一种改进频谱纯度的DDS倍频方案 …… 70
3.3 采用DDS上变频扩展频带 …… 72
3.3.1 上变频器原理分析…… 72
3.3.2 DDS上变频扩展频带方案 …… 75
3.4 采用DDS+PLL扩展频带 …… 76
3.5 低相噪高分辨率直接数字频率合成器的设计…… 77
3.5.1 低相噪高分辨率频率合成器的性能指标…… 77
3.5.2 DDS芯片及参数选择 …… 77
3.5.3 频率合成器的方案…… 80
3.5.4 控制电路设计…… 81
第4章 宽带、超宽带雷达信号波形产生器的设计 …… 86
4.1 宽带、超宽带信号频率扩展技术(DDS+PLL+混频)
…… 86
4.1.1 数字锁相频率合成器的基本原理…… 86

4.1.2 数字锁相环路的传递函数及环路参数…… 88
4.1.3 数字锁相频率合成器的相位噪声…… 89
4.1.4 利用 DDS + PLL + 混频扩展频带…… 91
4.2 DDS/ PLL 组合信号波形合成器 …… 92
4.2.1 环外混频式 DDS/ PLL 频率合成器 …… 92
4.2.2 环内插入混频 DDS/ PLL 频率合成器 …… 93
4.2.3 DDS 激励 PLL 的频率合成器及相噪和
杂散的分析…… 95
4.3 超宽带雷达信号波形产生器的设计与实现 …… 101
4.3.1 超宽带雷达信号波形产生器方案拟定 …… 101
4.3.2 超宽带雷达信号波形产生器的设计 …… 103
4.3.3 信号波形产生器电路的 PCB 板图设计 …… 129
4.3.4 超宽带雷达信号波形产生器试验结果 …… 132
第 5 章 数字频率合成器的高速控制电路设计 …… 136
5.1 高速控制电路方案选择及主要功能 …… 136
5.1.1 高速控制电路方案选择 …… 136
5.1.2 主机通信接口 …… 137
5.2 高速控制电路硬件设计 …… 139
5.2.1 高速控制电路硬件结构方框图 …… 139
5.2.2 TMS320C31 复位电路…… 141
5.2.3 TMS320C31 导引电路…… 141
5.2.4 高速控制系统译码电路设计 …… 145
5.2.5 高速控制系统存储器结构 …… 148
5.2.6 C31 的中断控制系统 …… 149
5.2.7 系统自检电路 …… 152
5.2.8 TMS320C31 存储器结构 …… 153
5.2.9 数据输入缓冲器 74F244 …… 153
5.2.10 通信控制缓冲器…… 153
5.2.11 DDS 控制命令输出缓冲器 74F574 …… 154
5.2.12 PLL 控制信号及 MAX501 控制输出缓冲器 … 154

需要全本请访问 www.ertongbook.com

5.2.13 MAX550 控制信号 …… 154
5.2.14 数据输出缓冲器 …… 167
5.3 微机控制的高速控制电路软件设计 …… 167
第 6 章 宽带雷达信号波形产生软件设计 …… 171
6.1 信号波形产生程序的数据结构及其算法 …… 171
6.1.1 线性调频矩形脉冲信号 …… 171
6.1.2 非线性调频信号 …… 175
6.1.3 连续波雷达信号 …… 179
6.1.4 单载频脉冲信号 …… 180
6.1.5 Barker 码序列脉冲信号 …… 181
6.1.6 M—序列脉冲信号 …… 185
6.1.7 其他波形 …… 187
6.2 雷达信号波形库的程序设计 …… 189
6.2.1 用 Delphi 语言编写宽带雷达信号波形库 …… 189
6.2.2 软件系统方框图及软件流程图 …… 189
6.3 软件系统对硬件的控制 …… 196
6.3.1 对 DDS 及 Q3236 的控制 …… 196
6.3.2 微机与 DSP 间的数据通信 …… 197
6.4 雷达信号波形库控制界面 …… 201
6.4.1 软件系统实现功能及主要参数 …… 201
6.4.2 控制界面及使用说明 …… 202
缩略语英汉对照表 …… 208
参考文献 …… 210

Contents

Chapter 1 Theoretical Analysis of Wideband Radar Signals ····· 1
1.1 Classification of Radar Signal Waveforms & Ways to Widen Bandwidth ····· 1
1.2 Theoretical Basis for Design of Wideband Radar Signal Waveforms ····· 3
1.2.1 Radar Signal Waveforms-Signal Detection-Matchfiltering ····· 3
1.2.2 Estimation for Signal Forms & Destination parameters (R,v) ····· 4
1.2.3 Radar Resolution & Signal Waveforms ····· 5
1.2.4 Signal for Large Timewidth Bandwidth Product - Pulse Compress ····· 10
1.2.5 Relation between Signal Waveform & Radar "E.C.M." ····· 11
1.3 Principles of Radar Signal Waveform Design ····· 13
1.3.1 Generic Method of Waveform Design ····· 13
1.3.2 Problems to be Solved in Waveform Design ····· 13
1.3.3 Mutual Restriction of Radar Signal Parameters ··· 14
1.4 Several Typical Wideband Radar Signals ····· 15
1.4.1 Radar Signal with a Ambiguity Diagram of Plumb Sharp Shape ····· 15
1.4.2 Radar Signal with a Ambiguity Diagram of Thumb Sharp Shape ····· 16

1.4.3 Radar Signal with a Ambiguity Diagram of Shear Knife Shape ····· 18
1.4.4 Radar Signal with a Ambiguity Diagram of Nail Bed Shape ····· 21
1.4.5 Several Radar Signals of Special Shapes ····· 25
Chapter 2 Generating Technology of Radar Signal Waveforms & Direct Digital Synthesis (DDS) ····· 28
2.1 General Development of Generating Technology of Radar Signal Waveforms ····· 28
2.1.1 Pulse Radar & CW Radar (or FM CW Radar) Signals ····· 28
2.1.2 Generation & Development of Linear FM Signal ····· 30
2.1.3 Directly Digitally Synthesized Complex Waveforms ····· 33
2.2 Working Principle & Characteristic of DDS ····· 34
2.2.1 Working Principle of DDS ····· 35
2.2.2 Characteristic of DDS ····· 37
2.3 Analysis on Frequency Spectrum Characteristic of DDS Output Signals ····· 41
2.3.1 Analysis on Frequency Spectrum Characteristic of DDS Output Signals with Ideal Parameter Waveform Output ····· 41
2.3.2 Analysis on Frequency Spectrum Characteristic of DDS Output Signals with Practical Parameter Waveform Output ····· 44
2.4 How to Improve The Frequency Spectrum Purity of DDS ····· 49
2.5 Consideration in Design of Low Spurious DDS Chip ····· 53

2.5.1 Design of Waveform Memory ····· 53
2.5.2 Effective Output of Optimized Phase Accumulation ····· 56
2.5.3 Selection of DAC ····· 59
Chapter 3 New Generating Technologies of Wideband Radar Signal Waveforms ····· 63
3.1 Generating Wideband Radar Signals Directly with DDS ····· 63
3.2 Widening Frequency Band with DDS + Multiplied Frequency ····· 66
3.2.1 Multiplied Frequency Principle ····· 66
3.2.2 Scheme to Widen Frequency Band with DDS + Multiplied Frequency ····· 69
3.2.3 A Scheme for DDS Multiplied Frequency to Improve the Frequency Spectrum Purity ····· 70
3.3 Widening Frequency Band with DDS Up-frequency Conversion ····· 72
3.3.1 Analysis on Up-Frequency Conversion Psinciple ····· 72
3.3.2 Scheme to Widen Frequency Band with DDS Up-frequency Conversion ····· 75
3.4 Widening Frequency Band with DDS + PLL ····· 76
3.5 Design Of Low Phase Noise, High Resolution Direct Digital Frequency Synthesizer ····· 77
3.5.1 Characteristics of Low Phase Noise, High Resolution Frequency Synthesizer ····· 77
3.5.2 DDS Chip & Parameter Choice ····· 77
3.5.3 Design of Frequency Synthesizer Scheme ····· 80
3.5.4 Design of Control Circuit ····· 81
Chapter 4 Design of Wideband, Ultra-Wideband Radar

Signal Waveform Generator ····· 86
4.1 Expanding Technology of Wide Band, Ultra Wide Band Signal Frequency ····· 86
4.1.1 Fundamental Principle of Digital Phase - Locked Frequency Synthesizer ····· 86
4.1.2 Transfer Function & Loop Circuit Parameter of Digital Phase-Locked Loop ····· 88
4.1.3 Phase Noise of Digital Phase-Locked Frequency Synthesizer ····· 89
4.1.4 Widening Frequency Band with DDS + PLL + Mixture Frequency ····· 91
4.2 DDS/ PLL Combinatorial Signal Waveforms Synthesizer ····· 92
4.2.1 DDS/ PLL Frequency Synthesizer with Out Loop Mixture Frequency ····· 92
4.2.2 DDS/ PLL Frequency Synthesizer In Loop Inset Mixture Frequency ····· 93
4.2.3 DDS/ PLL Frequency Synthesizer & Analysis on Phase Noise & Spurious ····· 95
4.3 Design & Realization of Ultra-Wideband Radar Signal Waveform Generator ····· 101
4.3.1 Scheme of Ultra-Wideband Radar Signal Waveform Generator ····· 101
4.3.2 Design Of Ultra-Wideband Radar Signal Waveform Generator ····· 103
4.3.3 PCB Design of Signal Waveform Generator Circuit ····· 129
4.3.4 Experiment Result of Ultra-Wideband Radar Signal Waveform Generator ····· 132
Chapter 5 Design of High-Speed Control Circuits for

Digital Frequency Synthesizer ····· 136
5.1 Scheme Selection & Majoe Function of High-Speed Control Circuits ····· 136
5.1.1 Scheme Selection of High-Speed Control Circuits ····· 136
5.1.2 Host Computer Communication Interface ····· 137
5.2 Hardware Design for High-Speed Control Circuits ··· 139
5.2.1 Hardware Structure Block Diagram for High-Speed Control Circuits ····· 139
5.2.2 TMS320C31 Reset Circuit ····· 141
5.2.3 TMS320C31 Guard Circuit ····· 141
5.2.4 Decoding Circuits Design for High-speed Control System ····· 145
5.2.5 Memory Structure of High-Speed Control System ····· 148
5.2.6 C31 Interruption Control System ····· 149
5.2.7 System Self-Checking Circuit ····· 152
5.2.8 TMS320C31 Memory Structure ····· 153
5.2.9 Data Input Buffer 74F244 ····· 153
5.2.10 Communication Control Buffer ····· 153
5.2.11 DDS Control Command Output Buffer 74F574(U2) ····· 154
5.2.12 PLL Control Signal & MAX501 Control Output Buffer ····· 154
5.2.13 MAX550 Control Signal ····· 154
5.2.14 Data Output Buffer ····· 167
5.3 Software Design for Microcomputer Controlled High-Speed Control Circuits ····· 167
Chapter 6 Software Design for Wideband Radar Signal Waveform Generation ····· 171

需要全本请访问 www.ertongbook.com