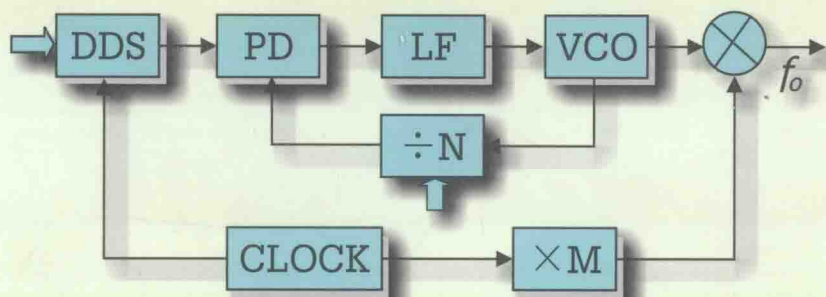


现代频率合成与控制技术

Modern Frequency Synthesis and Control Technology

高玉良 李延辉 俞志强 何明浩 蔡小勇 著



航空工业出版社

现代频率合成与 控制技术

Modern Frequency Synthesis and
Control Technology

高玉良 李延辉
俞志强 何明浩 蔡小勇
著

航空工业出版社

内 容 提 要

全书共分为5章,比较系统、全面地总结了频率合成领域近几年来的最新研究成果,介绍了当今在这一领域的有关关键技术与热点技术。本书取材新颖,内容丰富,以系统与技术为中心,全面论述了现代宽带、低相位噪声频率合成与高精度自适应控制的新技术、新方法,并从工程应用的角度,列举、分析了大量具有代表性和重要参考价值的工程方案设计实例,其中也包含了作者多年来的研究成果,考虑到实用性,所有技术方案,均可直接使用。

本书主要是为雷达、通信及电子对抗等领域从事频率合成和自适应控制研究、设计的工程技术人员和研究人员撰写的,也可供上述相关专业的高年级学生和从事这方面教学、研究的教师与研究生参考,是一本很有实用价值的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代频率合成与控制技术 / 高玉良等著. ——北京: 航空工业出版社, 2002.9

ISBN 7-80183-059-8

I. 现... II. 高... III. 频率合成技术 IV. TN74

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第074898号

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

空军雷达学院印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2002年9月第1版

2002年9月第1次印刷

开本: 850×1168 1/32

印张: 8.25

字数: 210千字

印数: 1—1000

定价: 48.00元

前 言

作为雷达、通信、电子对抗、仪器仪表等电子系统的重要基础设备，频率合成器总是对这些系统某些主要指标的最终性能有着决定性的影响。同所有事物发展规律一样，频率合成技术的发展有力地推动了整个电子技术及相关产业的发展。与此相适应，集多种电路技术于一体的频率合成技术又是随着其他基础电路技术的发展而发展的。

从 20 世纪 30 年代频率合成技术问世以来，最初进入实用的是直接频率合成技术，锁相式频率合成技术的应用引发了频率合成技术发展史上的第一次革命，直接数字式频率合成技术的出现导致了频率合成领域的第二次革命，它的应用大大拓展了频率合成领域的发展空间，并在较短的时间内得到了迅速的发展和越来越广泛的应用。由于其涉及的领域多、专业面广、发展快、技术日新月异，传统的基本理论及电路模型已显得不相适应，迫切需要充实、完善并建立一套完整的理论、技术体系来适应不断发展的技术进步。同时，从频率合成技术应用现状与发展情况出发，以系统与技术为中心，全面系统地介绍当今频率合成领域的有关键技术与热点技术，以推动频率合成技术的进一步研究与应用，这是撰写本书的初衷，希望作者的努力是成功的。

作为国内最新的研究频率合成与控制技术的专著，在内容上力求全面反映当今国内外最新的研究成果，并做到全面和系统进而形成理论体系，融先进性、实用性和系统性于一体，突出理论性与工程实践性的紧密结合。在风格上力求工程化、实用、可读，除非必要时尽量免去繁琐冗长的数学推导。书中列举、分析了大量具有代表性的和重要参考价值的工程技术方案，包含了作者多年来的研究成果和个人观点，有的还属首次发表。

本书结构如下：

第 1 章为概述，介绍了频率合成技术的发展状况和趋势，并对国内外的研究现状和水平作了分析，指出了频率合成技术的发展方向及其在电子系统中的应用。

第 2 章为频率合成器的理论基础，介绍了直接频率合成器、锁相环间接频率合成器、直接数字频率合成器的基本原理及基本技术，对各自的杂散、相位噪声等进行了分析。结合频率合成器的主要技术指标，讨论了三种类型合成器的各自特点并进行了相互比较，为频率合成器的综合方法设计及自适应控制设计提供了理论基础。

第 3 章介绍了频率合成器的综合方法设计。根据直接频率合成(DS)技术、间接频率合成(IS)技术及直接数字频率合成(DDS)技术的各自特点，将它们有机结合、优势互补，根据不同的应用场合提出分析了数字锁相环频率合成、DDS 直接合成、DDS+上变频、DDS+倍频、DDS/PLL 环外混频式频率合成、DDS 激励 PLL 的频率合成、环内插入混频 DDS/PLL 频率合成、DDS+PLL+混频、DDS+倍频+混频以及基于 DDS 的综合性频率合成等十多种合成技术方案，论述了它们实现的可行性及性能。

第 4 章讨论频率合成器的自适应控制，介绍了各种类型的自适应频率合成器的工程技术方案，并详细阐述了全数字式的高精度测频方法。自适应控制的机理是通过中对中频进行精确测频，控制基于 DDS 的宽带本振源的输出频率，实现对射频信号的搜索、跟踪，从而保证接收的中频为精确的固定中频，要求自适应系统搜索跟踪速度快、范围大、分辨率高和精度高，同时能满足本振信号大带宽、低相噪和自适应的要求，由此相对照，给出了具有详细工程方案的设计实例，并介绍了设计方法和步骤。

第 5 章介绍频率合成器的电磁兼容性(EMC)设计。从电磁兼容性的基本原理出发，详细地阐述了电磁兼容性设计的几个关

键技术：接地技术、屏蔽技术、滤波技术和 PCB 板设计技术。

附录 A 介绍单片集成频率合成器及其应用。优选当今国际上先进的具有较高性价比的单片频率合成器，包括 AD9850、AD9851、AD9852、AD9854 和 PE3236 等，详细介绍它们的性能特点及其实际应用。

本书由高玉良拟定撰写提纲、组织撰写，由高玉良、李延辉、俞志强、何明浩和蔡小勇等参加撰写，全书由高玉良统稿和最后定稿。

本书引用、吸收了国内外同行在频率合成领域的许多科研、学术成果，是他们的出色工作推动了频率合成技术的快速发展，作者首先对他们表示深深的谢意和崇高的敬意。

本书在撰写过程中还得到了空军雷达学院的大力支持，同时，也得到了航空工业出版社的大力支持。特别是为本书录入、编辑的程柏林同志为此付出了辛勤的劳动，并且做了大量的实验、仿真、文稿整理等工作，没有他们的支持和帮助，本书是无法完成和出版的，在此一并表示感谢。

由于作者理论和技术水平有限，再加上时间紧，书中肯定存在不妥和错误之处，诚挚希望相关领域的专家和读者提出批评指正。

著者

2002 年 9 月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 频率合成技术的发展概况	1
1.2 频率合成技术的国内外现状	2
1.3 频率合成技术的应用及发展趋势	4
第 2 章 基本频率合成技术及其特点	8
2.1 频率合成器的主要技术指标	8
2.2 直接频率合成 (DS) 技术	11
2.2.1 直接频率合成器组成及工作原理	12
2.2.2 混频器组合频率分量图的使用	15
2.2.3 直接频率合成方法举例	18
2.3 间接频率合成 (IS) 技术	22
2.3.1 锁相环工作原理	22
2.3.2 锁相环各个部件的作用	23
2.3.3 锁相环的相位模型	26
2.3.4 锁相环的频率跟踪与捕获性能	30
2.3.5 锁相环频率合成器的稳定性问题	32
2.3.6 锁相环频率合成器的杂散分析	33
2.3.7 锁相环频率合成器的相位噪声分析	35
2.3.8 锁相频率综合合成方法	37
2.3.9 低相噪、低杂波数字锁相环滤波器设计	44
2.4 直接数字频率合成 (DDS) 技术	52
2.4.1 直接数字频率合成技术的工作原理	52
2.4.2 直接数字频率合成技术的特点	57

2.4.3	直接数字频率合成输出信号的频谱分析	60
2.4.4	提高直接数字频率合成频谱纯度(降低杂散)的方法	69
2.4.5	DDS 杂散抑制技术在频率捷变雷达中的应用	73
2.5	三种基本频率合成技术的各自特点及其性能比较	78
2.5.1	直接频率合成(DS)的技术特点	78
2.5.2	间接频率合成(IS)的技术特点	79
2.5.3	直接数字频率合成(DDS)的技术特点	80
第3章	频率合成器的综合方法设计	81
3.1	数字锁相环频率合成器	81
3.1.1	常规数字锁相频率合成器	82
3.1.2	先进的数字锁相合成器	85
3.2	用 DDS 直接产生宽带信号	91
3.3	采用 DDS+上变频扩展频段	93
3.4	DDS+倍频扩展频带	95
3.4.1	设计实例一	95
3.4.2	设计实例二	97
3.5	一种 X 波段 DDS+倍频+上变频合成的频率源方案	100
3.5.1	X 波段频率源的实现	101
3.5.2	杂波分析	101
3.5.3	相位噪声分析	102
3.6	环外混频式 DDS/PLL 频率合成器	104
3.7	DDS 激励 PLL 的频率合成器	107
3.8	环内插入混频 DDS/PLL 频率合成器	109
3.9	一种由 DDS+PLL+混频构成的超宽带频率合成方案	111

3.10	基于 DDS 的综合性频率合成方案	113
3.10.1	方案介绍及分析	114
3.10.2	基本技术性能的理论估算	115
3.11	DDS+PLL 组合方案的相位噪声和杂散性能的分析	119
3.12	参考源对 PLL 输出杂散和相位噪声影响的分析	121
第 4 章	频率合成器的自适应控制	126
4.1	基于带通鉴频特性的自适应频率合成器	127
4.1.1	系统组成与工作原理	127
4.1.2	结果与展望	129
4.2	基于低通滤波控制特性的自适应频率合成器	130
4.2.1	系统组成和工作原理	130
4.2.2	系统性能分析	131
4.3	一种 DDS 环内插入式自适应频率合成器	133
4.3.1	系统组成与工作原理	133
4.3.2	问题讨论	135
4.4	基于高精度数字测频的自适应频率合成器	136
4.4.1	频率的高速高精度测量	136
4.4.2	一种 DDS 直接合成的高精度自适应本振源	142
4.4.3	一种 DDS 激励 PLL 的高精度自适应本振源	146
4.4.4	一种 L 波段宽带自适应本振源的设计	162
第 5 章	频率合成器的电磁兼容性 (EMC) 设计	166
5.1	电磁兼容性 (EMC) 的基本概念	166
5.2	频率合成器电磁兼容性设计	169
5.2.1	接地设计	169

5.2.2	屏蔽设计	178
5.2.3	滤波设计	187
5.2.4	PCB 板设计	188
附录 A 单片集成频率合成器产品介绍及其应用		
A.1	AD9850 特性、组成、引脚功能、控制方式、 使用注意事项及其应用	202
A.2	AD9851 特性、组成、引脚功能、控制方式、 使用注意事项及其应用	209
A.3	AD9852 特性、组成、引脚功能、控制方式、 使用注意事项及其应用	215
A.4	AD9854 简介	235
A.5	高性能数字锁相环频率合成器 PE3236 及其应用举例	236
缩略语英汉对照表		
		249
参考文献		
		251

第 1 章 概 述

1.1 频率合成技术的发展概况

频率源是雷达、通信、电子对抗等电子系统实现高性能指标的关键，很多现代电子设备和系统的功能的实现都直接依赖于所用的频率源的性能，因此频率源被人们喻为众多电子系统的“心脏”，而当今高性能的频率源均通过频率合成技术来实现。

频率合成技术大约出现于 20 世纪 30 年代，至今已有 60 多年的历史，最初产生并进入实际应用的是直接合成技术，它具有频率转换时间短、近载频相位噪声性能好等优点，但由于采用大量的倍频、分频、混频和滤波环节，直接式频率合成器的结构复杂、体积大、成本高，而且容易产生过多的杂散分量，难以达到较高的频谱纯度。60 年代末 70 年代初，相位反馈理论和模拟锁相技术在频率合成领域里的应用，引发了频率合成技术发展史上的一次革命，相干锁相式合成技术就是这场革命的直接产物。随后数字化的锁相环路部件如数字鉴相器、数字可编程分频器等的应用及其在锁相频率合成技术中的应用标志着数字锁相频率合成技术得以形成。由于不断吸收和利用如吞脉冲计数器、小数分频器、多模分频器等数字技术发展的新成果，数字锁相频率合成技术日益成熟，锁相式频率合成器具有良好的窄带跟踪特性，可以很好地选择所需频率的信号，抑制杂散分量，并且可避免使用大量滤波器，十分有利于集成化和小型化。此外，还具有良好的长期频

率稳定度和短期频率稳定度。但由于锁相环本身是一个惰性环节，使得锁定时间较长，故锁相式频率合成器的频率转换时间较长。目前，锁相环频率合成器在各电子领域中获得较为广泛的应用。

直接数字式频率合成技术的出现导致了频率合成领域的第二次革命。1971年 J.Tierney、C.M.Rader 和 B.Gold 在“A Digital Frequency Synthesizer”一文中发表了关于新型数字频率合成的研究成果，第一次提出了具有工程实现可能和实际应用价值的直接数字频率合成的概念。尽管当时该项技术未能立即得以普遍的重视，但随着数字集成电路和微电子技术的发展，DDS 逐渐充分体现出其具有相对带宽很宽、频率转换时间极短、频率分辨率很高、输出相位连续、可输出宽带正交信号、任意波形输出能力、数字调制功能、可编程及全数字化结构便于集成等优越性能。DDS 的缺点是工作频带的限制和杂散抑制差。DDS 的工作频率主要受器件速度的限制，主要是 ROM 的 DAC 的速度限制。目前的微电子技术的水平，采用 CMOS 工艺的逻辑电路速度可达 60~80MHz，采用 TTL 工艺的逻辑电路的速度可达 150MHz，采用 ECL 工艺电路可达 300~400MHz，采用 GaAs 工艺可达 2~4GHz，所以目前 DDS 的最高输出频率为 1GHz 左右。DDS 的杂散是因 DDS 采用了相位截断技术；同时，波形存储器中的波形幅度量化所引起的有限字长效应和 DAC 的非理想线性也都对 DDS 的杂散抑制性能产生很大的影响。

1.2 频率合成技术的国内外现状

近年来，随着单片锁相式频率合成器、GaAs 等芯片的发展，锁相式、直接数字式以及 DDS 与 PLL 相结合所构成的频率合成器以其容易实现系列化、小型化、模块化、工程化及其优越的性

能已逐步成为三种最为典型、用处最为广泛的频率合成器，目前一系列性能优越的数字 PLL 和 DDS 产品相继问世。典型的单片 PLL 产品有美国 Motorola 公司的 MC145191、美国 Qualcomm 公司的 Q3036、Q3216、Q3236，Peregrine 公司推出的 PE3236 等。其中 PE3236 性能最佳，本底相位噪声达 -150dBc/Hz ，无鉴相死区，功耗 0.15W ，外接 VCO，滤波器工作频率可达 2.2GHz 。由于 DDS 技术的飞速发展，目前市场上性能优良的 DDS 产品不断推出，有 Qualcomm 公司的 Q2334、Q2220、Q2230、Q2240、Q2368 单片产品，AD 公司的 AD7008、AD9955 和 AD9850、AD9851、AD9852、AD9854、AD9857 单片产品，Sciteq 电器公司的 ADS-2 型、ADS-4 型和 ADS-431 型、ADS-432 型、ADS-631 型、ADS-632 型频率合成器产品，Stanford 公司的 Stel-1173、Stel-2173、Stel-2171 等单片产品。上述各系列的单片产品中，Stel-2171 为 GaAs 电路，参考时钟为 1GHz ，频率分辨率 0.3Hz ，杂散基底电平 -55dBc ，频率转换时间 25ns 。频率合成器 ADS-432 的参考时钟频率为 1.6GHz ，可正交输出，分辨率 1Hz ，杂散 -45dBc ，频率转换时间 30ns 。AD9852 芯片是一种高集成度的数字频率综合器，其参考时钟 300MHz ，内置 12 位正交双通道 DAC 输出。动态杂散性能达 -80dB ，具有独特的倒相辛格滤波器及多种掉电控制功能，通过软件编程及接口控制电路很容易产生高度稳定的频率 / 相位 / 幅度可编程的正弦波输出信号，还可以产生单路线性或非线性调频信号。AD9854 与 AD9852 是管脚兼容的合成器，所不同的是 AD9854 为双 DDS 输出。AD 系列产品以其较高的性能价格比，目前取得了极为广泛的应用。DDS 和 PLL 相结合构成的组合式频率合成器，既具有锁相环路窄带跟踪特性，又可以克服 DDS 的杂散多和输出带宽窄的缺陷，解决了锁相式频率合成器分辨率不高和频率转换时间较长的问题，还具有成本低和结构简单的特点。目前国外已推出 DDS+PLL 组合式频率合

成器产品,如美国 Sciteq 电器公司的 VDS-1701(200~400MHz)、VDS-1702(400~800MHz)、VDS-1703(800~1250MHz)、VDS-1704(1200~1600MHz)和 VDS-1705(1600~2400MHz),杂散小于-60dBc,频率步进小于 100kHz。在国内利用 DDS+PLL 组合方案实现的应用系统已十分广泛地应用于雷达、通信、电子对抗和制导武器等系统中。

1.3 频率合成技术的应用及发展趋势

更宽的工作频带、更精确的频率分辨率、更低的相位噪声和寄生特性、更快的频率转换时间以及减小体积、降低功耗是对现代频率合成器提出的越来越严格的要求,DDS+PLL 混合式频率合成技术将 DDS 的高频率分辨率及快速转换时间特性与锁相环路的输出频率高、寄生噪声和杂波低的特点有机结合,以尽可能全面地满足各种系统对频率源苛刻的要求;同时还降低了合成器的成本。从而是目前开发应用最为广泛的一种方法,采用 DDS 技术、变频技术、锁相环技术可以合成很高的输出频率,其技术指标也远远高于过去的卫星通信用合成器及典型仪器用合成器。

近年来,随着通信、雷达技术的发展,系统相位噪声的重要性日益显著。在采用 PSK(相移键控)、SCPC-FM(单路载波调频)、FDM/FM(频分复用/调频)等微波干线和卫星通信系统以及 MTI(动目标显示)、CW(连续波)、FM(调频)等雷达中,系统性能指标和成本与系统相位噪声性能的关系很密切。如在采用卫星传输密码的通信系统中,相位噪声是一个关键性的性能指标,两个卫星终端之间的同步主要取决于发射机的载波源和接收机的本振源的相位稳定性,当其中任意一个信号源突然发生相位变化(如相位颤动、相位跳跃或相位冲击)时,系统就会发生失

步，导致传输质量下降，甚至遭受破坏。又如在数字微波通信系统中，接收机多采用相关载波恢复解调器进行解调，系统的相位噪声性能决定了系统的波特率容量带宽。DDS 与 PLL 相结合所构成的频率合成器以其优越的相位稳定性和极低的颤噪效应为这些传输系统提供了理想的频率源。

电子战是现代战争中的一种重要斗争手段，电子战中的通信系统所处的环境信号越来越密集，各种干扰越来越大。目前，通信系统广泛采用的抗干扰方式主要有两种：一种是快速跳频即通过收发双方预约好的、以随机信号做调制源周期性地依次高速变换频率的抗干扰方法。提高跳频速度和展宽跳频范围（即增加跳频信道数）可提高跳频电台的抗干扰能力，增加跳频频率组合时序的复杂性能，提高通信的保密度。过去，由于受锁相频率合成器合成信号的信道数、频率转换时间及频率带宽范围的限制，一般跳频电台都属于中低频跳频电台，而美国的 Sciteq Electronics 公司生产的全数字化 DDS——“ADS-2”输出的频率源合成信号可在 0.1~250MHz 的频率范围内，以 6Hz 的频率步长、20ns 的转换速度进行频率步进调谐，而且相位噪声极低。因此，采用 DDS 在短波和超短波频段内实现宽频带、高速跳频抗干扰技术不是很困难的了。另外一种抗干扰的方法就是直接序列通信即通过某种调制手段，直接扩展欲传送信息的发射信号带宽，也就是所谓的扩频技术。它与调制方式相比具有接收信噪比高、抗跟踪干扰和窃听能力强、测距定位精确和抗多径效应性能好等一系列优点，广泛地应用于卫星通信、定位导航、地空通信及地面各主要固定电台站的通信网络中。这种通信的关键——频谱扩展是通过信息数据对高速伪随机码序列进行扩频调制实现的，对载波及伪随机码的变换速率及载波的相位噪声性能要求很高。DDS 以其相位噪声低、调谐速度快的特点为扩频通信系统提供了准确、快捷的频率信号源。

任意波形发生器是一种实时模拟仿真的高精密信号发生器，是各种模拟分析研究的良好工具，其中最关键的核心部件即采用了直接数字合成技术，它与一般 DDS 的主要区别就在于其波形存储器不仅存入了正弦波形，还可以存入如方波、三角波、锯齿波等大量非正弦波数据，并且这些数据可通过手控或用计算机编程进行控制，以便任意改变输出信号的波形。因此，它可模拟诸如编码雷达信号、潜水艇特征信号、磁盘数据信号、机械振动瞬变过程、电视信号以及各种各样的神经脉冲之类的波形，也能重现由数字存储示波器（DSO）捕获的波形。为逼真地模拟多普勒效应和雷达信号，要求信号发生器具有非常快的频率转换时间，以将传输时间减到最短，并且在两个离散频率的信号之间没有其他任何无用信号。而 DDS 所具有的连续的相位变换、快速的频率转换、精确的细调步进与简单的精确模拟仿真提供了最佳方式和手段，这是其他频率合成方法都不能与之相比的。惠普公司生产的 HP8770A 任意波形发生器，使用砷化镓集成电路器件构成 DDS，其输出信号可在 0~50MHz 的频率带宽内，以 8ns 的切换速度进行快速步进调谐。

数字通信具有通信容量大、抗干扰性能强、保密性能好、通信效率高的特点，在现代通信技术中已得到广泛应用，其调制方式也越来越多，二进制相移键控（BPSK）、正交相移键控（QPSK）和最小相移键控（MSK）都是伴随数字通信技术发展起来的数字调制方式，它们都要求对载波进行精确的相位控制。过去多采用锁相环路进行调制，电路复杂、对环路的稳定性有不利影响，而且相位精度和准确度难以保证。DDS 是一个理想的调制器，几个部件相联就会产生离散的调频与调相结合的结果，相位累加器的位数决定了合成信号的相位精度，一个 32 位的相位累加器可产生近 43 亿个离散的相位电平，而相位精度可控制在 8×10^{-8} 度的范围之内，因此，在转换频率时，只要通过预置相位累加器的初

始值，即可精确地控制合成信号的相位，很容易实现各种数字调制方式。

DDS 当然不仅限于上述应用，它还可用于核磁共振分光镜及各种测量仪器设备中。

DDS 是一个神奇的频率合成技术，它实现了合成信号的频率转换速度与频率准确度的统一，为系统提供了优于模拟信号源的性能，是当今雷达、通信技术高速发展所不可缺少的一个重要工具和设计手段。随着硅和砷化镓集成电路工艺的发展，DDS 的性能会得到进一步改善。可以预言，DDS 与 PLL 相结合将是今天和未来高性能频率合成器的希望，也是系统频率信号源的主要发展方向。