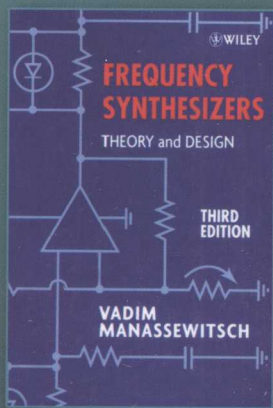


国外电子与通信教材系列



频率合成原理与设计 (第三版)

Frequency Synthesizers Theory and Design
Third Edition



[美] Vadim Manassewitsch 著
何松柏 宋亚梅 鲍景富 等译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

频率合成原理与设计

(第三版)

Frequency Synthesizers Theory and Design
Third Edition

[美] Vadim Manassewitsch 著

何松柏 宋亚梅 鲍景富 等译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

频率合成器是现代电子系统的核心,本书从频率合成的基本概念入手,对频率稳定度概念和以锁相为主的频率合成方式等相关知识进行了深入讲解。主要内容包括频率合成的基本知识、频率合成器系统分析(杂散、相位噪声理论等)、屏蔽理论、模拟锁相环、数字锁相环、基本电路、各种频率合成方案、频率合成参考源、频率合成器的故障诊断、快捷变频率合成技术等。

本书内容丰富,可以作为电子信息类专业本科和研究生教材,也可以供相关研究人员作为参考设计书。

Vadim Manassewitsch: **Frequency Synthesizers Theory and Design, Third Edition.**

ISBN 0-471-77263-1

Copyright © 2005, John Wiley & Sons, Inc.

All Rights Reserved. Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

Simplified Chinese translation edition Copyright © 2008 by John Wiley & Sons, Inc. and Publishing House of Electronics Industry.

本书中文简体字翻译版由 John Wiley & Sons 授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2007-1369

图书在版编目(CIP)数据

频率合成原理与设计: 第3版/(美)梅纳西威特克(Manassewitsch, V.)著;何松柏,宋亚梅,鲍景富等译.
北京:电子工业出版社,2008.1

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Frequency Synthesizers Theory and Design, Third Edition

ISBN 978-7-121-05540-9

I. 频… II. ①梅… ②何… ③宋… ④鲍… III. 频率合成器-教材 IV. TN74

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第190584号

责任编辑:谭海平

印 刷:北京冶金大业印刷有限公司

装 订:三河市万和装订厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:24 字数:614.5千字

印 次:2008年1月第1次印刷

定 价:42.00元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老教师和专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授

“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

主 任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐	北京邮电大学校长、教授、博士生导师
	杨千里	总参通信部副部长, 中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事、博士生导师
委 员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 国务院学位委员会学科评议组成员
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员 中国电子学会常务理事
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报(英文版)》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘 彩	中国通信学会副理事长兼秘书长, 教授级高工 信息产业部通信科技委副主任
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员
	张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长
	范平志	西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长

译 者 序

频率源是通信、雷达、仪器、空间电子设备和电视等电子系统的核心,其好坏直接影响电子系统的性能指标。频率综合技术已有近 80 年的历史,所经历的发展大致分为以下几个技术阶段:直接频率合成、锁相间接式频率合成、直接数字式频率合成、分数频率合成以及混合式频率合成。其中,锁相间接式频率合成是目前最成熟并且使用最多的频率合成方式之一。快捷变、低相噪频率合成器是目前雷达等系统的研究热点,而高性能、小体积、低功耗、高集成度,以及低成本频率合成器是通信等系统的研究重点。读者需要一本讲解频率合成技术系统的书籍,以全面掌握相关知识。因此,我们很高兴将这本书翻译出来推荐给大家。

本书从频率合成器的基本概念入手,对频率稳定相关概念及以锁相为主的频率合成方式的相关知识进行了深入讲解。主要内容包括:频率合成的基本知识、频率合成器系统分析(杂散、相位噪声理论等)、屏蔽理论、模拟锁相环、数字锁相环、基本电路、各种频率合成方案、频率合成器参考源、频率合成器的故障诊断、快捷变频率合成等。本书可以作为相关专业高年级本科生的专业教材参考书,以及研究生的专业课程教材。此外,还可以供相关研究院(所)的工程技术人员参考。

本书由电子科技大学工程学院的何松柏、鲍景富和宋亚梅等翻译,其中第 1 章和第 2 章及第 10 章由鲍景富负责翻译和初校,第 3 章、第 6 章和第 8 章由宋亚梅负责翻译和初校,第 4 章、第 5 章、第 7 章和第 9 章由何松柏负责翻译和初校,全书由何松柏负责协调工作和统稿。参与本书翻译、录入和校对工作并给予帮助的还包括杨媛媛、徐伟、余香起、张芸、牛栋正、胡世飞、曹韬和张晶等。因此,本书的翻译出版是集体智慧的结晶。在此,对所有为这本书的出版提供过帮助的人们表示诚挚的感谢!

由于译者水平有限,书中涉及的概念和名词较多,难免有翻译不妥之处,恳请广大读者批评指正。

前言

本书的目的是给设计和使用频率合成的相关人员提供培训和参考资料,也可作为频率产生与控制专业研究生的教材。

选取本书内容是为了达到这样一个目的:让读者形成基本的设计原理和设计方法,以实现频率合成严格的指标要求。本书的重点是快速合成,设计这样的合成需要掌握多门学科的各种综合知识。

本书的内容尽可能按照逻辑顺序讲述。第1章描述了各种频率合成方法以及使用于频率合成过程中的不同功能模块,如混频模块、振荡器模块、倍频模块和分频模块。为了凸显快速合成的重要性,在此特别对直接数字频率合成实现方法加以分析,这些讨论对读者进一步学习后面的章节具有很深的指导意义。第2章对频率合成进行了系统分析,例如对于给定的一系列指标要求,介绍如何通过进行最佳的系统设计来控制相位噪声。此外,本章还描述了用来测量杂散输出、相位噪声和频率切换时间的各种技术。第3章讲述如何控制由频率合成器产生的杂散信号的传播,主张设计好的射频屏蔽是非常有效的。第4章、第5章和第6章详细阐述了频率合成器有关电路的设计。锁相环由于自身的广泛应用在这里得到特别关注。这些电路的设计和测试在第4章和第5章,以及本书结尾的章节中得到了详细阐述。第7章充分运用前面章节的内容来描述最新型的合成器,以使读者熟悉应用这些设备时所要考虑的系统问题。第8章对参考源进行了讨论,包括铷原子和铯原子频率标准。第9章讲述了直接以及间接频率合成器的故障诊断理论,涵盖了在系统中用来帮助找出设计和加工问题的许多实际方法,这些内容对技术研发人员和工程师是非常有帮助的。第10章讲述了快速合成器的设计,并详细讨论了具有快速频率切换时间的锁相环。

为满足当前该领域快速发展的需求,本书在1976年出版之后又修订了两次。本版增添了許多新的频率合成技术,加入了快速频率合成器的研究成果,简要说明了参考频率源性能指标的最新发展。为满足新技术发展的需求,书中用最新的测试仪器代替了已过时的测试仪器。本书是对频率产生与控制领域最新发展的总结,包括美国及其他国家的一些研究设计成果。

在此,感谢与我一起为本书努力工作过的所有同事。通过与他们讨论,我得以全面了解频率合成器的设计方法,熟悉本书所讲述的电路设计技术。感谢佐治亚理工学院的 J. A. Connolly 教授和其他为增强本书可读性提出许多有用建议的读者。我要特别感谢 Virginia Spriggs 女士,感谢她对本书进行的仔细阅读和修订,以及为本书写作风格提出的有益建议。

Vadim Manassewitsch

纽约州,纽约市

目 录

第 1 章 频率合成	1
1.1 非相干合成法	1
1.2 相干直接合成法	4
1.2.1 混合法	4
1.2.2 谐波法	4
1.2.3 双混频法	7
1.2.4 三混频法	7
1.2.5 双混频-分频法	10
1.3 相干间接频率合成	14
1.3.1 模拟锁相环	14
1.3.2 数字锁相环	19
1.4 相干直接数字合成	24
1.5 小数 N 分频锁相环	28
1.6 小结	31
参考文献	31
第 2 章 系统分析	33
2.1 杂散输出	34
2.1.1 幅度调制	34
2.1.2 单音频率调制和相位调制	35
2.1.3 混频器中的互调分量	39
2.1.4 倍频器中的杂散信号	46
2.1.5 分频器中的杂散信号	48
2.1.6 理想限幅器中的杂散信号	50
2.1.7 幅度调制至相位调制的转换	53
2.1.8 分解单个杂散信号为 AM 和 FM 成分	59
2.1.9 工频频率杂散信号输出	61
2.1.10 减小杂散输出的技术	62
2.1.11 测量杂散输出的技术	63
2.2 相位噪声	66
2.2.1 频率源的稳定度	66
2.2.2 噪声类型	69
2.2.3 振荡器中的相位噪声	70
2.2.4 射频放大器和倍频器中的相位噪声	74
2.2.5 限幅器中的噪声	77

2.2.6	分频器中的相位噪声	78
2.2.7	减小相位噪声的技术	79
2.2.8	相位噪声的测试技术	79
2.3	带宽切换速度的考虑	92
2.4	合成器切换时间的测量技术	93
2.5	系统设计示例	94
	参考文献	101
第3章	屏蔽	104
3.1	静电场	105
3.1.1	无屏蔽	105
3.1.2	静电屏蔽	106
3.1.3	未接地或接地不良的屏蔽	108
3.1.4	屏蔽罩屏蔽	109
3.1.5	距离屏蔽	109
3.2	电磁场	109
3.3	磁场	110
3.4	电磁屏蔽	111
3.4.1	屏蔽效率	111
3.4.2	对近场的屏蔽	112
3.4.3	对远场的屏蔽	118
3.4.4	屏蔽的间断	119
3.5	设计要考虑的问题	121
3.5.1	组装	121
3.5.2	衬垫	124
3.5.3	腐蚀和电镀使屏蔽效率下降	127
3.5.4	屏蔽材料	130
3.5.5	射频导线的干扰	131
3.5.6	脉冲干扰	139
	参考文献	148
第4章	模拟锁相环	150
4.1	反馈系统的基本原理	150
4.2	锁相环的性能	154
4.2.1	传递函数	156
4.2.2	一阶锁相环	157
4.2.3	二阶锁相环	161
4.2.4	使用理想积分器的二阶锁相环	166
4.2.5	捕获	169
4.2.6	模拟锁相环的稳态度	171
4.3	相位噪声	177
4.4	杂散输出	179

85	4.4.1 调幅	179
95	4.4.2 调相	180
95	4.4.3 与 PLL 最终输出无关的杂散信号	180
99	4.5 模拟 PLL 设计示例	181
99	参考文献	183
101	第 5 章 数字锁相环	184
101	5.1 数字锁相环的性能	184
101	5.1.1 传递函数	185
101	5.1.2 一阶锁相环	186
101	5.1.3 二阶锁相环	188
101	5.1.4 采用理想积分滤波器的二阶锁相环	190
101	5.2 设计分析	192
101	参考文献	199
101	第 6 章 基本电路	200
101	6.1 调谐放大器	200
101	6.2 射频混频器	205
101	6.2.1 晶体管混频器	206
101	6.2.2 场效应管混频器	207
101	6.2.3 二极管混频器	210
101	6.2.4 参量混频器	211
101	6.3 倍频器	216
101	6.3.1 晶体管倍频器	217
101	6.3.2 饱和线圈倍频器	217
101	6.3.3 阶跃恢复二极管倍频器	219
101	6.3.4 锁相环式倍频器	224
101	6.4 分频器	225
101	6.4.1 再生式分频器	225
101	6.4.2 锁定振荡器分频器	226
101	6.4.3 数字分频器	227
101	6.4.4 载流子存储二分频器	231
101	6.4.5 参量二分频器	234
101	6.4.6 锁相环式分频器	236
101	6.5 压控振荡器	236
101	6.5.1 考毕兹振荡器	237
101	6.5.2 传输线压控振荡器	245
101	6.6 晶体振荡器的频率牵引技术	248
101	6.7 鉴相器	254
101	6.7.1 正弦鉴相器	254
101	6.7.2 取样-保持相位比较器	256
101	6.8 鉴频器	260

6.8.1	福斯特-西利鉴频器	260
6.8.2	平衡鉴频器	263
6.9	锁相环捕获的扫描电路	264
6.9.1	单结晶体管张弛振荡器	264
6.9.2	多谐振荡器	268
6.10	压控振荡器调谐电路	269
	参考文献	272
第7章	频率合成器	275
7.1	非相干频率合成器	275
7.2	相干频率合成器	279
7.2.1	John Fluke MFG 公司生产的 645A 型高频频率合成器	279
7.2.2	Hewlett Packard 公司生产的 5105A/5110B 型 UHF 频率合成器	284
7.2.3	GI/ESD 数字频率合成器	288
7.3	微波合成器	293
7.3.1	Systron-Donner 1600 系列 UHF-SHF 频率合成器	297
7.3.2	Watkins-Johnson 公司制造的 WJ-1250 型 UHF-SHF 频率合成器	302
7.4	Wavetek 公司生产的 5100 型直接数字频率合成器	306
7.5	Hewlett Packard 8662A 型合成信号发生器	308
7.6	Wavetek 5155A 型混合方式频率合成器	315
	参考文献	320
第8章	频率参考源	322
8.1	晶控振荡器	322
8.2	原子频率标准	327
8.2.1	304D 型铷原子频率标准(Tracor 公司制造)	327
8.2.2	5061A 型铯束原子频标(Hewlett Packard 公司制造)	331
	参考文献	336
第9章	频率合成器的故障诊断	337
9.1	基本方法	337
9.1.1	分析	337
9.1.2	模块划分	338
9.1.3	选择测试仪器	338
9.1.4	模块替换,消除故障	341
9.1.5	采集数据	341
9.1.6	将数据与技术指标对比	344
9.2	混频器输出杂散	344
9.2.1	单混频器	344
9.2.2	两个混频器级联	346
9.3	直接频率合成器的故障诊断	346
9.4	间接式频率合成器——锁相环的故障诊断	347

9.4.1	锁相环的闭环测试	347
9.4.2	锁相环的开环测试	349
9.5	实例分析	351
第 10 章	快速切换时间合成器	355
10.1	系统方法	355
10.1.1	直接模拟合成器	355
10.1.2	直接数字合成器	355
10.1.3	间接数字合成器	356
10.1.4	混合合成器——快速跳频最好的选择	356
10.2	锁相环合成器的系统优化	357
10.2.1	最大环路带宽	357
10.2.2	自动带宽切换	358
10.2.3	带分频器的锁相环	358
10.2.4	多环合成器	359
10.2.5	锁相环和直接数字式合成器	360
10.2.6	双混频合成法中的锁相环	361
10.3	锁相环合成器的电路优化	361
10.3.1	快速转换的压控振荡器	361
10.3.2	高速取样-保持相位比较器	362
10.3.3	环路滤波器	364
附录 A		365
附录 B		370

第1章 频率合成

频率合成是由一个或几个参考频率源产生一个或多个频率的系统元件的组合。频率合成器的早期形式是可控晶体振荡器,包括一组手动切换的开关。这种频率合成器的频率精度和稳定度由石英晶体的准确度和稳定度来决定,广义来说,由电路本身决定。

此后更常用的是非相干频率合成方法,但是可控石英晶体振荡器并没有被完全取代。非相干频率合成利用多个晶体振荡器产生一系列频点,较之可控晶体振荡器使用了更少的晶体。

随着技术的进步,非相干频率合成技术已经不能满足迅速发展的通信领域对于频率精度和稳定度的需求。这些系统要求的精度和稳定度比非相干频率合成法所能达到的指标要高几个数量级。为达到需求,出现了一系列新方法,归类于相干合成器。由名字可看出,这些方法使用同一个参考源,产生一系列满足精度和稳定度需求的频点。

这些技术导致了杂散输出的产生,而这些杂散输出必须依靠在合成器中选择合适的频率以及使用滤波器来抑制。此外,不能忽视对相位噪声的影响。

随着对这些相干频率合成技术认识的深入,在除了地面和空间通信系统中的应用外的其他应用领域,这些技术也得以认知,比如多普勒雷达。频率合成器的可编程高速频率切换的能力扩大了在实验室以及产品测试中其测试各种电路和系统的应用。比如,用于测试目的的窄带晶体滤波器和检测目的的多通道遥测系统。

为了满足不同应用和时刻变化着的技术需求,频率产生系统变得越来越复杂而又昂贵,并且难以实现。第7章详细讨论了这些系统的构成,介绍了一些现在常用的频率合成器。本章的目的是使学生熟悉各种频率合成技术的一些基本概念。

1.1 非相干合成法

非相干合成器由输入频率产生输出频率的方式多种多样,具体方式取决于应用。输出频率范围、最小频率步进的数值、频率稳定度和精度、输出杂散电平、尺寸大小、成本和功率损耗这些因素决定了方法的选择。这种技术的主要目的在于减少晶体振荡器以及基本模块(如振荡器、混频器、滤波器等)的数量来降低成本。当然,其他技术也针对这个目的。

下面讨论一种典型的非相干合成器的例子,由此将指出这种方法存在的局限性和设计问题。感兴趣的学生可以参考 Lindholm, Ross 和 Baltas 的文献(参见参考文献[1~3])来了解关于这方面的更广泛介绍。

图 1.1 所示为非相干合成法的原理框图,它与 H. Granger 提出的系统相同(参见参考文献[3])。该合成法利用连续外差法,左边混频器的输出是两个输入频率的和:

$$f_{n-1} + f_n + \frac{(\Delta f_{0-9})_{n-1}}{10^{n-2}} + \frac{(\Delta f_{0-9})_n}{10^{n-1}}$$

Δf_{0-9} 意味着从基本频率 $\Delta f_0 = 0$ 开始的 10 个步进。例如, $f_n + (\Delta f_{0-9})_n / 10^{n-1}$ 意味着第 n 个振荡器能够预置产生 10 个频率:

$$f_n, f_n + \frac{(\Delta f_1)_n}{10^{n-1}}, f_n + \frac{(\Delta f_2)_n}{10^{n-1}}, \dots, f_n + \frac{(\Delta f_9)_n}{10^{n-1}}$$

这种式子用来描述输出频率在产生该频率环节的相对权重数字,还用来跟踪频率合成中权重数字的传递情况。同样,图中的其他振荡器也可分别设置,因为它们有独立的控制逻辑。因此,可同时产生

$$f_n + \frac{(\Delta f_0)_n}{10^{n-1}} \quad \text{和} \quad f_{n-1} + \frac{(\Delta f_0)_{n-1}}{10^{n-2}}$$

圆括号的下标表示输出频率表达式中 Δf_{0-9} 所产生的位置。所以, $(\Delta f_{0-9})_n$ 总是表示这个表达式的最低有效位。

在图 1.1 中所省略的下一个混频器的输出是两个输入信号的和:

$$f_{n-2} + f_{n-1} + f_n + \frac{(\Delta f_{0-9})_{n-2}}{10^{n-3}} + \frac{(\Delta f_{0-9})_{n-1}}{10^{n-2}} + \frac{(\Delta f_{0-9})_n}{10^{n-1}}$$

最终输出是所有频率的和:

$$f_{\text{out}} = f_1 + f_2 + \dots + f_{n-1} + f_n + (\Delta f_{0-9})_1 + \frac{(\Delta f_{0-9})_2}{10} + \dots + \frac{(\Delta f_{0-9})_{n-1}}{10^{n-2}} + \frac{(\Delta f_{0-9})_n}{10^{n-1}} \quad (1.1)$$

为了阐述原理,图中每个振荡器都采用了 10 个石英晶体;当然,可以使用任意个数的晶体(参见参考文献[1]和参考文献[3])。

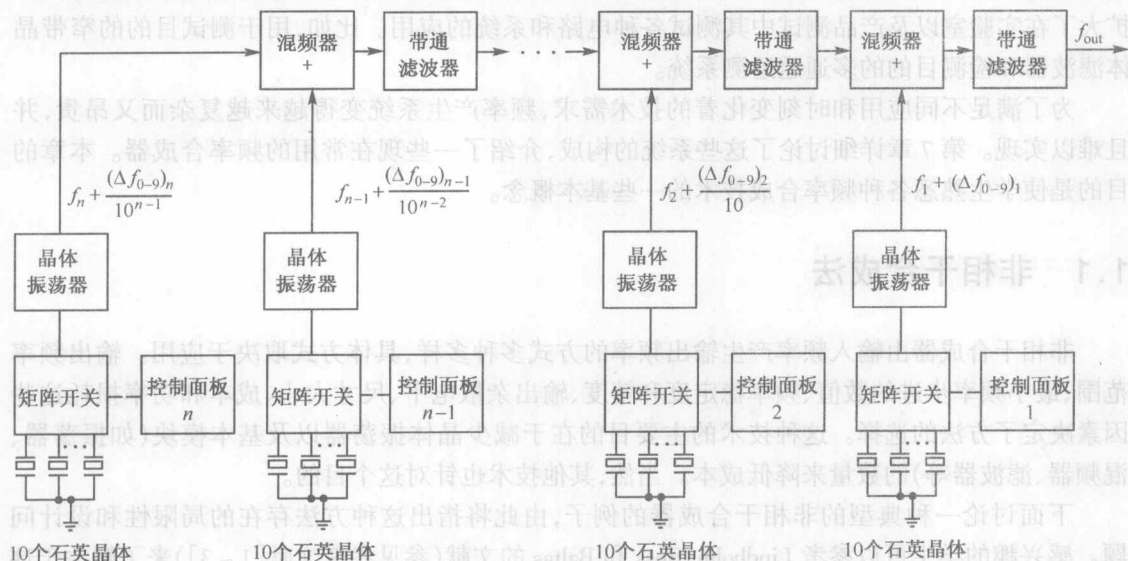


图 1.1 非相干合成

图 1.2 中示出了带具体数值的例子,阐述了该方法的实际工作情况。假设只需要 58 ~ 59 MHz 的输出频率和最小输出频率步进 1 kHz,为了产生 1000 个频点, $n = 3$ 。通常, $f_1 \sim f_n$ 的选择由要求的杂散输出电平来决定。为简单起见,可以省略了这一步。

令

$$f_1 = 47.0 \text{ MHz}$$

$$f_2 = 6.0 \text{ MHz}$$

$$f_3 = 5.0 \text{ MHz}$$

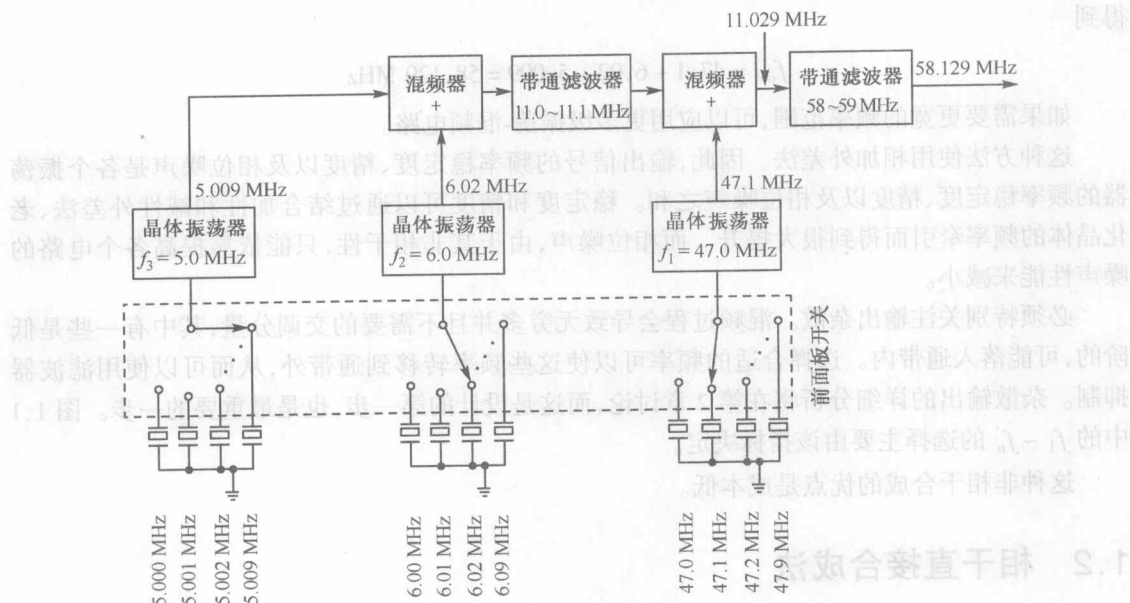


图 1.2 非相干合成示例

为得到 1 kHz 频率步进,

$$\frac{(\Delta f_1)_n}{10^{n-1}} = \frac{(\Delta f_1)_3}{10^2} = 1 \text{ kHz}$$

或

$$\Delta f_1 = 0.1 \text{ MHz}$$

因此,

$$\Delta f_0 = 0.0$$

$$\Delta f_1 = 0.1$$

$$\Delta f_2 = 0.2 \text{ MHz}$$

$$\Delta f_9 = 0.9$$

设置 (Δf_{0-9}) 中的频率,使 $(\Delta f_0)_1 = (\Delta f_0)_2 = (\Delta f_0)_3 = 0 \text{ MHz}$,用式(1.1)可以得出最小输出频率为

$$(f_{\text{out}})_{\min} = 47 + 6 + 5 = 58.0 \text{ MHz}$$

同样设置 (Δf_{0-9}) 中的频率,使 $(\Delta f_9)_1 = (\Delta f_9)_2 = (\Delta f_9)_3 = 0.9 \text{ MHz}$,可以得到最大输出频率为

$$(f_{\text{out}})_{\max} = 47.9 + 6.09 + 5.009 = 58.999 \text{ MHz}$$

例如,需要输出 58.129 MHz,则可以进行如下设置:

$$(\Delta f_{0-9})_1 \sim (\Delta f_1)_1 = 0.1 \text{ MHz}$$

$$(\Delta f_{0-9})_2 \sim (\Delta f_2)_2 = 0.2 \text{ MHz}$$

$$(\Delta f_{0-9})_3 \sim (\Delta f_3)_3 = 0.9 \text{ MHz}$$

得到

$$f_{\text{out}} = 47.1 + 6.02 + 5.009 = 58.129 \text{ MHz}$$

如果需要更宽的频率范围,可以应用更多级振荡-混频电路。

这种方法使用相加外差法。因此,输出信号的频率稳定度、精度以及相位噪声是各个振荡器的频率稳定度、精度以及相位噪声之和。稳定度和精度可以通过结合加性和减性外差法、老化晶体的频率牵引而得到很大提升。而相位噪声,由于其非相干性,只能依靠提高各个电路的噪声性能来减小。

必须特别关注输出杂散。混频过程会导致无穷多并且不需要的交调分量,其中有一些是低阶的,可能落入通带内。选择合适的频率可以使这些频率转移到通带外,从而可以使用滤波器抑制。杂散输出的详细分析将在第2章讨论,而这是设计的第一步,也是最重要的一步。图1.1中的 $f_1 \sim f_n$ 的选择主要由该指标决定。

这种非相干合成的优点是成本低。

1.2 相干直接合成法

非相干合成法和相干合成法最主要的不同是,合成过程中所用的基准频率源的数量不同。第一种方法有许多受控制石英晶体振荡器,而第二种方法只使用一个参考频率源。因此,这种合成器等同于参考频率源所具有的稳定度和精度。

生产带有10乘以 n 个开关可切换的石英晶体的 n 个受控的石英晶体振荡器[稳定度为 $1/10^8$ /天,精度为 $\pm 5/10^7$ (5年前的要求)]已经非常困难,而且很难证明使用这么昂贵的成本来投资是正当的。而生产只有一个石英晶体的这种振荡器来驱动其余电路却是一件很容易的工作。在现阶段,稳定度为 $1/10^9$ 的频率源在市场上很容易得到且价格很低。

从一个参考频率得到所有频率使得相干合成法成为一种不可缺少的方法。

1.2.1 混合法

当需要产生数目比较少的频率时,通常可用混合法或谐波法。在要求一些频率同时产生的条件下,优先使用混合法。

混合法的基本模块是倍频器、分频器、混频器和一个参考频率源。图1.3所示为混合法的一个示例。为简洁表示,图中的放大器和滤波器都未绘制,其中的6个频率点20.0 MHz, 21.5 MHz, 22.0 MHz, 23.5 MHz, 24.0 MHz和25.5 MHz可以用很多方法产生。感兴趣的读者可以证明图1.3所示的方法并非最好的,即还有其它方法采用更少的模块来产生这些频率。遗憾的是,对于设计者来说,最优化的系统定义没有清晰的界限,更少的模块系统可能很昂贵。能够发现由滤波器、放大器和隔离器构成的系统部分可以进行成本评估。因此,建议设计者在选择不同的方法、完善详细系统和电路分析、限定所有电路、决定各种方法的成本时,选择成本最优的方法。

混合法技术能用模拟电路和数字电路的方法来实现(参见参考文献[4~6])。

混合法有两个基本问题需要考虑:(1)混频、倍频和分频产生的杂散输出;(2)相位噪声。这些问题将在第2章讨论。

这种方法在合成器中广泛用于产生辅助频率。

1.2.2 谐波法

当在整个输出频率范围内,任意两个相邻输出频率之间的间隔均为同一个常数频率时,