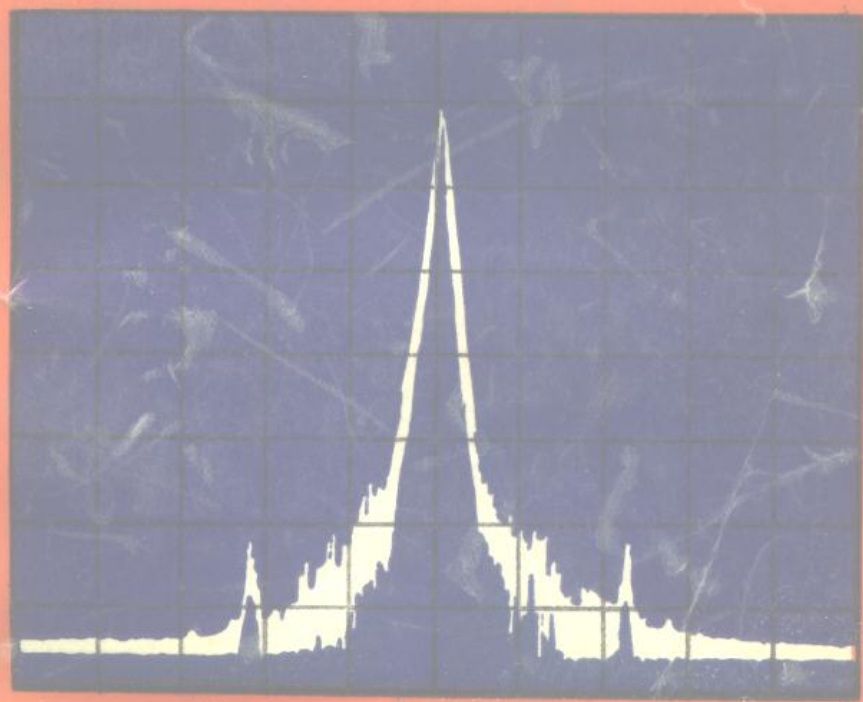


频率合成与锁相技术

戴逸民 编著



中国科学技术大学出版社

频率合成与锁相技术

戴逸民 编著

中国科学技术大学出版社

1995·合肥

DT42/33

内容简介

本书是作者多年教学和科研工作经验的积累,共三篇十章。内容包括:频率合成器的基本原理、常用频率合成器性能分析、锁相环基础、锁相环的线性分析、非线性分析和基本部件,以及锁相环技术的应用与新进展(包含锁相同步技术、自适应FIR相位预测器、数字调谐技术和全数字锁相环)。本书密切结合工程实际,详细分析了锁相环的计算机模拟方法与四种典型锁相环路的设计方法;为方便读者,书末附有典型锁相环路的性能、参数、调试方法、锁相环路的计算机模拟程序与锁相环路典型产品的型号、生产厂家和主要特性。

本书的特点是:内容新颖,概念清晰,实践性强,突出新技术,许多内容,特别是后四章是国内现有同类图书所不备的。此外,还设有有一定数量的习题和教学实验,以帮助初学者全面理解和掌握所涉及的内容。

本书可作为高等院校工科电子类专业的本科生教材,亦可供相关专业研究生及从事电子技术教学、科研和工程技术人员作参考书。

(皖)新登字 08 号

频率合成与锁相技术

戴逸民 编著

中国科学技术大学出版社出版发行
(安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本: 850×1168/32 印张:11 字数: 286 千字

1995 年 2 月第 1 版 1995 年 2 月第 1 次印刷

印数:1—3000 册

ISBN7-312-00620-5/TN·23 定价: 8.50 元

(凡购买中国科大版图书,如有白页、缺页、倒页者,由本社发行部负责调换。)

前 言

随着微电子技术、计算机技术和移动通信技术的发展,频率合成与锁相环技术愈来愈受人们重视。人们利用频率合成技术,可从一个频率极其稳定的电磁波信号出发,在计算机或微处理机控制下,合成出大量的高稳定度、高准确度的频率。锁相环是一个频率与相位的同步控制系统,人们利用锁相环技术实现频率合成、相干检测、跟踪滤波、低门限接收、数字信号同步等工程任务。随着数字化、集成化、超高频锁相环的实现,使频率合成与锁相环技术在无线寻呼、无绳电话、移动卫星通信、彩色电视、高清晰度电视、录像机、立体声音响等领域得到广泛应用,它们已成为整个通信和电子领域的一项重要技术手段。

本书分三篇十章,从理论与实践结合上系统地介绍了频率合成器的基本原理、常用频率合成器性能分析、锁相环基础、锁相环的线性分析、非线性分析和基本部件,以及锁相环技术的应用与新进展(包含锁相同步技术、自适应 FIR 相位预测器、数字调谐技术和全数字锁相环工作原理)。并且,从工程实际出发,详细分析了锁相环的计算机模拟方法与四种典型锁相环路的设计方法;为方便读者,书末附有典型锁相环路的性能、参数、调试方法、锁相环路的计算机模拟程序与锁相环路典型产品的型号、生产厂家和主要特性。

本书是我多年教学和科研工作经验的积累,内容新颖,基本概念清晰,而且实践性强,除习题外,还按课程内容编排了教学实验。既可作为高等院校工科电子类专业的本科生教材或参考书,亦可供从事电子技术应用的科研和工程技术人员及研究生进行相关工作的参考书。

本书在编著过程中,得到了许多老师、同事和同学们的支持和

帮助,在这里我要感谢沈凤麟教授在业务上提供的帮助,感谢王东进副教授在工作上给予的帮助,感谢裴小平实验师在实验工作上给予的合作和帮助,此外,还要感谢曾经为本书的出版付出辛勤劳动的文峰、林蜀南、戴澍、段占云等同志。

由于编写时间的仓促,不仅搜集到的材料有限而且也难免有不妥和疏漏,甚至是错误之处,恳请读者的批评指正。

戴逸民

一九九四年八月于

中国科学技术大学

目 次

第一篇 频率合成

第一章 导 论	1
1.1 频率合成的含义与作用	2
1.2 频率合成器的设计考虑	3
1.3 频率与电压、电流的相互转换.....	4
1.4 频率的数学运算	6
1.4.1 加法和减法——混频器	6
1.4.2 倍频器.....	11
1.4.3 分频器.....	11
第二章 频率合成器的类型	15
2.1 数字(查表)合成器.....	15
2.2 直接合成法.....	18
2.2.1 漂移抵消法.....	19
2.2.2 简化的直接合成原理.....	21
2.3 锁相(间接)合成器.....	24
2.3.1 直接锁相法.....	25
2.3.2 数字式锁相法.....	26

第二篇 锁相环

第三章 锁相环基础	40
3.1 从频率反馈环(FMFB)到锁相环(PLL)	40
3.2 锁相环的工作原理.....	42
3.3 环路工作过程的定性说明.....	51
3.4 信号统计分析与锁相环.....	52

第四章 锁相环的线性分析	56
4.1 线性化概念	57
4.2 锁相环路的传递函数及其物理意义	58
4.3 锁相环的类型	61
4.3.1 一阶锁相环	61
4.3.2 二阶锁相环	62
4.3.3 具有滞后超前滤波器的二阶 PLL	64
4.3.4 稳态误差的情况	66
4.3.5 二阶二型锁相环	67
4.3.6 三阶三型锁相环	69
4.4 环路的稳定性	72
4.5 噪声对 PLL 工作的影响	77
4.6 离散时间的锁相环	82
第五章 锁相环的非线性分析	85
5.1 基本概念	85
5.2 相位捕获	86
5.2.1 一阶环路锁定状态的建立过程	86
5.2.2 一阶环路的差拍状态和频率牵引现象	89
5.2.3 一阶环路的同步带、捕捉带及捕捉时间	91
5.3 频率捕获	94
5.3.1 二阶二型锁相环的微分方程式	94
5.3.2 二阶二型锁相环相轨迹图和鉴相输出波形	95
5.3.3 二阶二型锁相环的捕捉时间	98
第六章 锁相环路的基本部件	100
6.1 压控振荡器	100
6.1.1 VCO 的形式	100
6.1.2 VCO 的性能指标	101
6.1.3 关于 VCO 的开环相位噪声问题	102
6.1.4 几个实用的 VCO 电路	104

6.2 鉴相器	111
6.2.1 乘法器	112
6.2.2 序列鉴相器	132
6.2.3 鉴频-鉴相器	135
6.3 辅助捕获电路	139

第三篇 锁相环的应用与发展

第七章 同步器——载波相位和码元定时恢复	150
7.1 概述	150
7.2 最佳(最大似然)载波相位估计	153
7.3 没有数据辅助系统情况下载波恢复	160
7.3.1 QAM 系统载波恢复(非数据辅助系统)	165
7.3.2 平方环输出的相位抖动	166
7.4 载波恢复器:数据辅助系统	168
7.5 码元定时恢复器	175
7.5.1 最大似然(ML)码元定时恢复系统	176
7.5.2 平方基准定时恢复器	181
7.5.3 全数字码元定时恢复器	185
7.6 组合式载波和定时恢复	188
7.6.1 具有对称调制类型的系统	193
7.7 周期性输入和扰码器	196
7.7.1 周期输入序列的码元定时恢复器	197
7.7.2 扰码系统	200
7.7.3 扰码器线性等效电路	202
第八章 锁相环技术的新进展	212
8.1 自适应载波恢复系统	212
8.1.1 直接判断式 PLL	212
8.1.2 自适应 FIR 相位预测器	214
8.1.3 预测 PLL 的性能	218

8.2	数字调谐技术	220
8.2.1	频率合成接收系统的简化方框图	220
8.2.2	PLL 集成电路的内部功能方框图	220
8.2.3	频率合成调谐系统的参数选择	222
8.2.4	微机控制锁相环的方法	224
8.3	数字锁相环	230
8.3.1	DPLL 与 MAP 估值之间关系	231
8.3.2	全数字锁相环实现	233
第九章	锁相环路的计算机模拟	243
9.1	模型考虑	243
9.2	独立式 PLL 模型	245
9.3	组合式 PLL 模型	252
9.4	锁相环作为相位跟踪器	261
9.5	锁相环作为 FM 解调器	265
9.6	延迟对组合式 PLL 模型性能影响	266
第十章	典型锁相环路的设计	269
10.1	三阶二型锁相环路设计	269
10.1.1	设计要求	269
10.1.2	设计原理与方法	271
10.1.3	环路滤波器 T_1 、 T_2 、 T_3 计算公式	273
10.1.4	设计结果	274
10.2	二阶一型数字锁相环快速设计	277
10.2.1	快速设计的原理	277
10.2.2	由数字锁相环的方案计算环路性能	282
10.3	超高频取样保持式锁相环路设计	283
10.3.1	基准频率的选择与提纯措施	283
10.3.2	取样脉冲形成电路的设计	284
10.3.3	桥式取样保持式鉴相器设计	284
10.3.4	超高频 320MHz~410MHz VCO 设计	286

10.4	集成锁相环路设计与选用	288
10.4.1	大规模集成锁相环的分类与选用	288
10.4.2	环路滤波器的设计	292
10.4.3	高速双模前置分频器的选择	296
10.4.4	基准晶体振荡器的设计	297
实验项目		299
实验一	模拟集成锁相环路 KD8041 的应用	299
实验二	数字锁相频率合成器	303
实验三	数字锁相倍频器	313
实验四	数字锁相调频信号解调器	317
附录		320
附录一	锁相环路的分类及其主要参数	320
附录二	锁相环路的跟踪性能与分类关系	321
附录三	锁相环路的计算机模拟程序	322
附录四	大规模集成锁相环的分类与典型产品	329
附录五	国内外通用单片集成锁相环	330
附录六	国内外通用单片集成锁相合成器部件	333
参考文献		338

第一章 导 论

频率合成和锁相技术是近年来发展起来的新兴技术。它们在雷达、通信、遥控遥测、电视广播和电子测量仪器等领域已得到广泛的应用。

频率合成器的应用之所以广泛,大概主要归因于两种趋向:一是由于通信频谱日益拥挤,二是由于计算机和微处理机的应用与日俱增。通信频谱拥挤要求有高精度的发射频率,以便于波道的密集分布;同时又要求选择频率十分容易,只有这样,才能有效地使用现有的波道;当用计算机或微处理机进行控制的时候,还要求能根据数字指令来选择频率。频率合成器正好能满足这些要求。

锁相环路的一个主要用途就是将含有噪声的振荡器放在锁相环路内,使它相位锁定到一个纯的信号上,使振荡器本身的噪声被抑制,它的输出将大大地提纯。基于这个原理制成的频率合成器称为锁相频率合成器。锁相环路的另一个主要性能是恢复淹没在噪声中的信号相位和频率,从而可以对信号进行相干检测。在过去30~40年间已完全证明相干检测方法对从事这个课题(淹没在噪声中的信号检测)的许多探讨是正确的。一方面,发射功率受不同的实际条件限制,例如受重量、功率消耗、费用、干扰以及国际上对功率辐射规定的限制。另一方面,所需要的通信距离越来越远,这就意味着预计的信号很微弱,普通的接收和检测技术不再适用,而相干技术则明显有效。因此,在现代高性能接收和检测设备中,把锁相环作为基本部件是很有利的。最初,锁相环路是与空间通信共同研究和发展起来的,现在越来越广泛地用于整个通信和电子领域,这是因为不仅从性能方面考虑,而且从价格、设计简单和调整方便的角度来看,采用锁相环路常常是最好的解决方式。

通常,人们把频率、相位看成是一些变量(如电压或电流)的参数,这些变量可以用来确定一个系统的状态。但是,在频率合成和锁相环的讨论中,则是把频率和相位本身作为一个状态变量。如同电压、电流一样,频率可在电路中进行加、减运算,同时也可乘以或除以一个常数,还可以把频率转换成其它形式的变量或把其它变量转换为频率。上述这些运算和转换,是频率合成的基本过程。因此我们将在第一章讨论它们。不过在这之前应当先简要地说明一下频率合成的含义,在设计频率合成器过程中需要考虑的问题。

1.1 频率合成的含义与作用

随着无线电技术的迅猛发展,雷达、导航、宇宙飞行、导弹以及空间探索工作的开展,需要高精度、高稳定度的频标源,这反过来也推动了频率标准的发展。自从石英晶体振荡器问世以来,随着原子频标的研制和大量生产,目前,作为频率标准的有石英晶体振荡器、铷原子振荡器、铯原子振荡器、氢原子振荡器……等。近三十年来,频率标准的准确度和稳定度有了很大的提高,就频率稳定度而言已提高了5个量级,由 10^{-8} 提高到 10^{-13} 量级。到目前为止,世界上研制出的频标中,最高精确度已达 5×10^{-13} 量级,长期频率稳定度最高者已进入 10^{-15} 量级。

我们知道,原子频标其造价是十分昂贵的。就是石英晶体振荡器,要做到高精度、高稳定度(例如 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ 量级),不采取严密措施也是不行的。所以要做到高准确度、高稳定度,其价格是比较高的。况且,石英晶体在全世界范围内是比较稀有的原料。

上述各种频率标准,不但造价昂贵,而且它们基本上都只能输出单一频率。而目前在生产实践和科学研究中,却往往要求获得大量的高稳定度的频率。如果大量的高稳定度的频率都用原子频标或石英晶体振荡器来获得,不但造价十分惊人,而且体积也将是十分庞大。在实践中,人们利用频率合成技术,从一个或几个标准频

率出发,可以合成出大量的频率,而且合成出来的频率其准确度和长期稳定度都是和基准频率完全一样的。例如,目前我校已经研制出的 100MHz 频率合成器其频率最小间隔为 1Hz,机内仅用了一个 5MHz 的高准确度和高稳定度的石英晶体振荡器。也就是说,利用一个 5MHz 晶振作为基准,合成出 10^8 个新的频率来。如果将机内的石英晶体振荡器换成频率准确度和稳定度更高的原子频标(外接),那么合成器的输出频率的准确度和稳定度也将提高到与外接频标相同,这就是频率合成技术引起人们重视的一个重要原因。

1.2 频率合成器的设计考虑

对频率合成器的设计的基本要求是:简单、经济、同时具有最佳性能指标,因此,设计频率合成器应考虑下列因素:

1. 杂波电平

设计合成器时,一个十分重要的问题是所产生信号的纯度,即消除无用旁频(噪声互调产物)的程度。为此,应对系统的每个部分细加考查。采用那些在理论上很少或不会产生无用旁频的电路是很有好处的。在实际应用时,采用适当的结构(屏蔽、去耦等),就可能获得杂波电平很低的信号。一般说来,用功率振荡器提供所需要的信号是很有利的。目前,国外可做到的低杂波电平已达 100dB。

2. 频率稳定度

为了使输出信号的频率稳定度与信号源(频率标准)相同,所有组合成的频率都必须从这个单一的信号源导出来。这就意味着由于自动频率控制环路存在频率跟踪误差,所以在频率合成器中一般不能采用自动频率控制环路。英国于八十年代初提出的新的频标要求是:在海上准确性能达到 1×10^{-9} ;稳定度达到 1×10^{-8} (以 10ms 以上的取样时间测量);噪声分量在与兆赫标准频率输出以下超过 140dB(以 200Hz 带宽在偏离标准输出 10kHz 处测

量)。

3. 电子调谐

调谐方法是设计频率合成器需要考虑的重要问题。原因如下:

(1)不需要高价的机械装置,不会磨坏活动的零件及不需要调整。

(2)可以采用简易的本机的或遥控的控制机构。

(3)可以不用马达和伺服系统。

(4)按照十进跳步电子调谐时,可以实现不同调谐系统的跟踪。

(5)采用这种固体化设计,有可能完全消除颤噪效应。这对振荡器避免干扰波相位调制具有十分重要的意义。因为调谐元件的振动会使环路设计遇到困难。

(6)整个装置放在若干分隔开的屏蔽匣中,以适应低杂波输出设备的需要。

4. 微小型化的可能性

对于通讯设备来说,体积小、重量轻是人们所希望的,只有具有高清晰度、高分辨能力的全自动合成器才能满足要求。国外已能够制造出封装的精密锁相环集成电路和集成电路可变分频器等。

5. 系统的稳定性

系统的选取还取决于所采用的电路之稳定性。如果高的稳定性只与温度、老化等有关,那么系统设计通常是简单的,但是在实践中却很困难,所以采用由稳定性指数比较保守的基本电路来设计合成器系统是较为可取的。

1.3 频率与电压、电流的相互转换

将频率转换成电压或将电压转换成频率的变换过程,如图1.1所示。

利用鉴频器可以把频率转换成电压。而鉴频器可以采用调谐

电路,以得到其幅度依赖于频率的信号,这就是鉴频过程,其目的在于获得与频率成比例变化的电压。

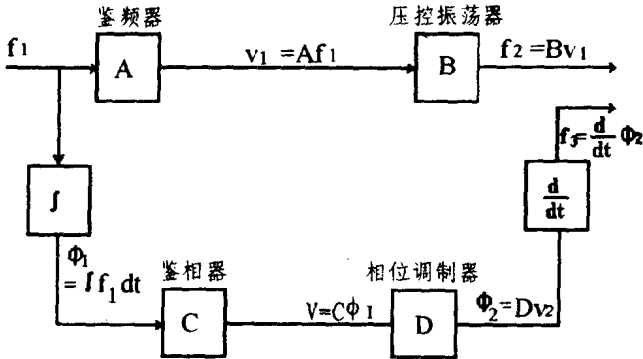


图 1.1 频率转换

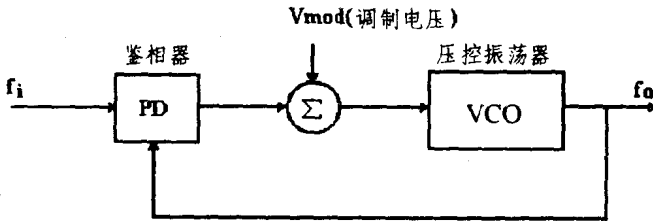


图 1.2 锁相环相位调制器

利用压控振荡器(VCO)可以把电压转换成频率。这里,调整电压改变变容二极管上的偏置,从而可以改变它的电容量及VCO的振荡频率。

利用鉴相器可把相位(频率的积分)转换成电压。一个普通的鉴相器是由两个输入信号彼此具有 90° 相移量的平衡混频器构成

的。

利用相位调制器可以把电压转换成相位。当改变变容二极管的偏置,并使变容二极管调谐电路的中心频率或截止频率发生变化的时候,变容二极管调谐电路就能改变相位。此外,相位正交的信号可以通过线性组合而产生所需要的相位。第三种方法可用图 1.2 所示电路举例说明。其中锁相环(PLL)用来把电压转换成相位。由于鉴相器(PD)的输出电压与相位成比例,同时由于锁相环总是迫使输出电压去抵消 V_{mod} ,从而 VCO 的相位将跟踪 V_{mod} 。

1.4 频率的数学运算

1.4.1 加法和减法——混频器

混频器用于获得两个输入信号的和频与差频(见图 1.3)。在混频器中,两个相混合的信号同时存在于非线性器件(二极管)中。正是这种非线性导致产生所需要的和频和差频信号,但是与此同时,也产生了许多其它信号,称作杂波输出(互调分量),为了弄清楚在混频器产生的杂波输出的频率和电平,扼要地描述一下混频器原理是必要的。

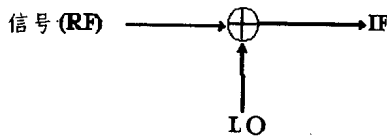


图 1.3 混频器的表示方法

一个混频器输入输出的关系可表达为:

$$e_{out} = K_1 e_{in} + K_2 e_{in}^2 + K_3 e_{in}^3 + \dots + K_n e_{in}^n + \dots \quad (1.1)$$

式中, $K_1, K_2 \cdots K_n$ 是混频器非线性特性的函数, e_{in} 是两个信号和直流项之和。

$$e_{in} = E_0 + A \sin \omega_1 t + B \sin \omega_2 t \quad (1.2)$$

ω_1 和 ω_2 分别表示两个输入信号的角频率。将(1.2)式代入(1.1)式中展开、化简并假设各项的系数均为1,得到:

$$\begin{aligned} e_{out} = & \text{直流项} + \sin \omega_1 t - \cos 2\omega_1 t + \sin 3\omega_1 t + \\ & \omega_1 \text{的其它谐波项} \\ & \pm \sin \omega_2 t - \cos 2\omega_2 t \pm \sin 3\omega_2 t + \omega_2 \text{的其它谐波项} \\ & \pm [\cos(\omega_2 - \omega_1)t - \cos(\omega_2 + \omega_1)t] \\ & \pm [\sin(\omega_2 - 2\omega_1)t + \sin(\omega_2 + 2\omega_1)t] \\ & + [\sin(2\omega_2 - \omega_1)t - \sin(2\omega_2 + \omega_1)t] \\ & + [\cos(2\omega_2 - 2\omega_1)t + \cos(2\omega_2 + 2\omega_1)t] \\ & \pm [\cos(3\omega_2 - \omega_1)t - \cos(3\omega_2 + \omega_1)t] \\ & \pm [\sin(3\omega_2 - 2\omega_1)t + \sin(3\omega_2 + 2\omega_1)t] \\ & + \dots \dots \dots \end{aligned} \quad (1.3)$$

一般来说,混频器互调产生的频率必须满足下式:

$$\omega_{m,n} = m\omega_1 \pm n\omega_2 \quad (1.4)$$

式中, m, n 是正整数, $\omega_{m,n}$ 是 $m \times n$ 互调产生的频率。 $m = n = 1$ 是我们希望发生的情况,所有其它的响应都是不希望的,必须借

助于滤波器,把它们减少到系统设计所允许的电平。但是,在许多实际情况下,不期望的互调分量落入滤波器的通带内,以致于不能依赖于滤波器滤掉。系统设计的任务是选择混频器的输入频率,使得互调产生的电平为允许值。

在频率合成器系统设计中,互调产生图是非常有用的。互调产生图表示了混频器输出频谱图。两条粗线分别表示和频 $F_2 + F_1$ 和差频 $F_2 - F_1$ 。图 1.4a 表示当两个频率 F_1 和 F_2 的信号同时加到一个非线性装置时,给出互调低于十阶 ($m + n = 10$) 的所有互调频率。水平线和垂直线分别表示输入频率 F_1/F_2 和输出频率