

锁相与频率合成技术

袁宇正 编著

SUO XIANG
YU PIN LU
HE CHENG JI SHU

武汉测绘科技大学出版社

73.4127/16

电子工业出版社(影)

锁相与频率合成技术

袁宇正 编著

武汉测绘科技大学出版社

(鄂)新登字 14 号

内容简介

本书共九章。第一章概述锁相与频率合成技术的几个基本问题；第二、三两章主要讨论锁相环路的基本原理和性能分析，包括线性性能分析、非线性性能分析和有噪声时的性能分析；第四章介绍数字锁相环路的基本组成、工作原理和性能分析；第五、六两章主要讨论频率合成器的基本原理、基本方法和性能分析；第七章讨论锁相频率合成器的设计、计算与测试；第八章介绍锁相与频率合成技术的主要应用；最后一章介绍集成电路和微机在锁相与频率合成技术中的应用。

本书可作为无线电技术、通讯工程、电子仪器及测量技术等专业学生的专业课教材；可供从事通讯、广播、电视、雷达、导航、遥控、遥测、电子测量、仪器仪表以及频率标准等工作的工程技术人员参考。

锁相与频率合成技术

袁宇正 编著

责任编辑 张鹏涛 冯 娟

*

武汉测绘科技大学出版社出版发行

武汉测绘科技大学出版社印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 10.375 254 千字

1992年2月第1版 1992年2月第1次印刷

印数 1—1500册 定价, 5.90元

*

ISBN 7-81030-127-6/T·24

前 言

本教材是根据无线电技术、通讯工程、电子仪器及测量技术等工科电子类专业本科生需要而编写的。

本课程的主要内容为锁相与频率合成技术的基本原理、性能分析、设计计算和主要应用。全书共九章,第一章绪论中着重讲清楚锁相与频率合成技术的定义、应用和发展;锁相环路和频率合成器的分类、组成和特点。第二、三章主要讨论锁相环路的基本原理和性能分析。包括线性性能分析、非线性性能分析、有噪声时的性能分析。考虑到数字技术的发展和数字锁相环路的应用,所以第四章介绍数字锁相环路的基本组成、工作原理和性能分析。第五、六章主要讨论频率合成器的基本原理、基本方法和性能分析。第七章讨论锁相频率合成器的设计计算与测试。第八章介绍锁相与频率合成技术的主要应用。随着集成技术的迅速发展和微型计算机的广泛应用,近年来,集成电路和微型计算机应用于锁相与频率合成技术越来越多。由于集成锁相环路、集成频率合成器成本低、性能好、使用方便、应用广泛,已成为电子工程中一种多功能组件;微型计算机已成为锁相环路和频率合成器设计计算和控制的现代化有力工具。为此,本书最后一章介绍集成电路和微型计算机在锁相与频率合成技术中的应用,扼要介绍集成化锁相环路和集成化频率合成器、微处理器在频率合成器中的应用。为使学生在专业课中更多地使用计算机,在这一章的最后一节编入了我们所做的锁相环路计算机辅助分析,主要是结合锁相环路的三种类型(即 RC 积分滤波器、无源比例积分滤波器和理想积分滤波器)编写了“IBM-PC PHASELOCKED LOOP ANALYSIS”程序设计和应用,以提高学生

结合教学内容使用计算机的能力。

本书每章附有思考题和习题。

华中理工大学王筠教授、黄载录教授对本书进行了审阅并提出了宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。由于编者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编者

1990年8月

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1-1 什么叫锁相与频率合成技术	(1)
§ 1-2 锁相与频率合成技术的发展和应	(2)
§ 1-3 锁相环路与频率合成器的分类和特点	(5)
第二章 锁相环路的基本原理	(9)
§ 2-1 锁相环路的基本组成	(9)
§ 2-2 锁相环路的基本方程和相位模型	(14)
§ 2-3 锁相环路的工作过程	(17)
§ 2-4 小结	(19)
思考与练习	(20)
第三章 锁相环路的性能分析	(22)
§ 3-1 锁相环路的线性性能分析	(22)
§ 3-1-1 线性化环路方程及其相位模型	(22)
§ 3-1-2 锁相环路的传递函数	(24)
§ 3-1-3 锁相环路的频率响应	(29)
§ 3-1-4 锁相环路的线性跟踪	(32)
§ 3-1-5 锁相环路的稳定性	(48)
§ 3-2 锁相环路的非线性性能分析	(57)
§ 3-2-1 一阶环路的非线性性能分析	(57)
§ 3-2-2 二阶环路的同步性能和捕捉过程	(63)
§ 3-2-3 扩大捕捉带和减小捕捉时间的方法	(71)
§ 3-3 存在有噪声时锁相环路的性能分析	(77)
§ 3-3-1 输入噪声对环路的影响	(79)
§ 3-3-2 环内噪声对环路的影响	(90)

3-3-3	环路性能的最佳化	(93)
3-3-4	存在输入噪声时环路的非线性性能分析	(97)
§ 3-4	小结	(105)
	思考与练习	(108)
第四章	数字锁相环路	(113)
§ 4-1	数字锁相环路的基本组成	(114)
§ 4-2	数字锁相环路的工作原理	(120)
4-2-1	数字锁相环路的相位锁定过程	(120)
4-2-2	数字锁相环路的基本方程及相位模型	(123)
§ 4-3	数字锁相环路的性能分析	(126)
4-3-1	相位阶跃响应	(126)
4-3-2	频率阶跃响应	(128)
§ 4-4	全数字锁相环路	(131)
4-4-1	一阶环路组成与基本方程	(132)
4-4-2	一阶环路的性能分析	(139)
4-4-3	n 阶环路的组成方案	(146)
§ 4-5	小结	(150)
	思考与练习	(151)
第五章	频率合成的基本原理和方法	(152)
§ 5-1	频率合成的基本原理	(153)
§ 5-2	频率合成的基本方法	(160)
5-2-1	直接频率合成法	(160)
5-2-2	锁相频率合成法	(165)
§ 5-3	程序分频器	(179)
5-3-1	分频比可变的十进计数器	(179)
5-3-2	程序分频器的工作原理	(180)
5-3-3	吞脉冲程序分频器	(183)
§ 5-4	小结	(185)

思考与练习	(187)
第六章 频率合成器性能分析	(188)
§ 6-1 频率合成器的频谱纯度分析	(188)
6-1-1 相位噪声的基本概念	(188)
6-1-2 频率合成器输出的频谱	(193)
6-1-3 相位噪声的四则运算	(194)
§ 6-2 频率合成器的寄生输出	(195)
6-2-1 环路对杂散干扰的滤除能力	(196)
6-2-2 减小寄生输出的实际方法	(201)
§ 6-3 频率合成器的输出相位噪声	(205)
6-3-1 频率合成器的噪声来源	(206)
6-3-2 各种输入噪声的功率谱密度	(207)
6-3-3 环路噪声响应	(211)
6-3-4 环路最佳参数选择	(214)
§ 6-4 小结	(217)
思考与练习	(219)
第七章 频率合成器的设计计算与测试	(221)
§ 7-1 频率合成器的主要技术指标	(221)
§ 7-2 频率合成器的设计计算	(223)
7-2-1 频率合成法的比较	(223)
7-2-2 原理方框图的确定	(225)
7-2-3 频率合成器的设计计算步骤	(237)
7-2-4 频率合成器的设计计算举例	(240)
§ 7-3 频率合成器的测试	(242)
7-3-1 锁相环路性能的测试	(242)
7-3-2 相位噪声的测试	(247)
§ 7-4 小结	(252)
思考与练习	(253)

第八章	锁相与频率合成技术的应用.....	(255)
§ 8-1	锁相技术的应用举例	(255)
8-1-1	锁相调制器与解调器	(255)
8-1-2	微波锁相频率源和微波锁相功率放大器	(264)
8-1-3	锁相环路对电机转速的控制系统	(267)
8-1-4	锁相倍频、分频和频率变换	(268)
§ 8-2	频率合成技术的应用举例	(271)
8-2-1	频率合成技术在通信中的应用	(271)
8-2-2	锁相频率合成在仪器、仪表中的应用	(273)
§ 8-3	小结	(277)
	思考与练习	(277)
第九章	集成电路和微型计算机在锁相与频率合成 技术中的应用.....	(279)
§ 9-1	单片集成锁相环路	(279)
9-1-1	通用单片锁相环路	(280)
9-1-2	专用单片锁相环路	(295)
§ 9-2	集成频率合成器	(299)
9-2-1	中规模单片集成频率合成器	(299)
9-2-2	大规模单片集成频率合成器	(300)
§ 9-3	微处理器(μP)在频率合成器中的应用	(302)
9-3-1	数字式频率程控	(302)
9-3-2	带有微处理器的频率合成器频率控制	(304)
§ 9-4	锁相环路计算机辅助分析	(307)
9-4-1	概述	(307)
9-4-2	锁相环路计算机辅助分析的数学模型	(309)
9-4-3	总体数据结构流程框图	(313)
9-4-4	IBM-PC 锁相环路分析程序的使用和举例	(313)
	思考与练习	(317)

第一章 绪 论

§ 1-1 什么叫锁相与频率合成技术

锁相技术是实现相位同步控制的一门新兴的科学技术。在各种通讯系统和电子设备中,为了提高它们的技术性能,广泛采用各种类型的反馈控制电路。在接收机中所应用的自动增益控制电路就是一种反馈控制电路,它是将接收机中频放大级的输出信号电平反馈到高频放大级的输入端和输入电平进行比较,以得到差值信号去控制放大器的增益,从而当感生在天线上的信号强度发生变化时仍能保持输出电平基本稳定,这种系统称为自动电平控制电路。与自动电平控制电路相类似,如果将系统的输出信号的频率反馈到系统的输入端与输入信号的频率进行比较的电路,这就是频率反馈电路。如果将系统的输出信号的相位反馈到系统的输入端与输入信号的相位进行比较的电路,这就是锁相环路。自动电平控制电路、频率反馈电路和锁相环路都是将输出量反馈到输入端与输入量进行比较而得到一个差值信号,再利用差值信号进行控制,使输出量稳定在所需要的数值上,它们之间的差别在于需要比较的和稳定的参量不同。可见,各种类型的反馈控制电路可以看作作为一种自动调节系统。所谓锁相环路是一个实现相位同步的控制系统。图 1-1 是一个锁相环路的原理方框图。在锁相环路中,鉴相器和压控振荡器分别为环路的反馈控制器和受控对象。输出信号 $v_o(t)$ 反馈到输入端,与输入信号 $v_i(t)$ 在鉴相器中比较它们的相位,得到一个比例于两信号相位差的误差电压,该电压经过环路滤波器后对压控振荡器调相,使输出信号相位跟踪上输入信号相位的变化。可见,它实质上是一个相位误差自动调节系统。锁相环路

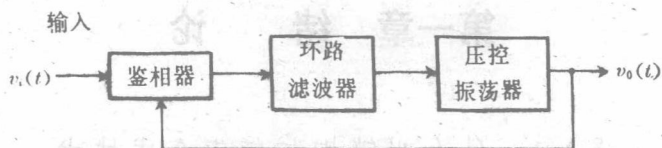


图 1-1 锁相环路原理方框图

能够有效地提取相位信息,这对于研究信息提取与信息处理是一种很有用的技术手段。

频率合成技术就是通过对高度稳定的频率进行加、减、乘、除的基本运算,以产生一系列离散频率的技术。高稳定频率一般由晶体振荡器获得。所产生的离散频率与晶体振荡频率成严格的正比关系。产生这些离散频率的设备称为频率合成器。锁相式频率合成器是锁相环路在频率合成中的应用。利用锁相环路做成的频率合成器比一般的频率合成器有着体积小、重量轻、成本低、功耗小、可靠性高、便于大量生产等优点。在现代电子学的各个领域内往往需要一个高精度的频率可变的信号源,并且要求由数字信号来控制,这就是数字式频率合成器。

§ 1-2 锁相与频率合成技术的发展和应

早在 1922 年无线电技术发展初期,有人首次发表“三极管振荡器的自动同步”文章,这是一篇锁相技术的原始文献。直到 1932 年 Debellescize 提出同步检波理论,使“相位同步”问题引起人们注意。实现同步检波的技术关键是如何产生一个本振信号,使它与同步检波器输入的微弱载波信号保持频率相同、相位保持一定关系(或叫相位相干)。对相位同步问题的研究,由此促进了锁相技术的萌芽。

到了 40 年代,电视接收机的扫描电路中开始使用相位同步电

路,它可以减小噪声对同步的影响,使电视图象的同步性能得到很大的改善。因此,锁相技术受到广泛的重视。但是由于过去电子器件和材料工艺的限制,使其制作复杂、成本较高,因此仅在要求较高的通讯、精密测量仪器以及电视机中采用。随着电子技术的发展,特别是由于空间技术应用的需要,进一步推动了锁相技术的发展。例如,人造卫星上所装的发射机功率很小(约10毫瓦),而接收距离则在几千公里以上,因而能收到的信号功率极其微弱,加之有多普勒频移及发射机振荡器的频率漂移,接收机的带宽又必须相当宽,而噪声强度是与带宽成正比的,这样接收机的输入信噪比就十分低,约在 $-10\sim-30\text{dB}$ 的数量级。在这种情况下,普通的接收技术就显得无能为力,只有采用带宽极窄的窄带锁相跟踪接收机才能把深埋在噪声中的信号提取出来。所以空间技术的发展,促进了人们对锁相技术及其理论作进一步探讨。目前锁相技术已经形成一个比较系统的理论,其应用之广几乎遍及整个无线电技术领域,从航天技术、无线电通讯、广播、电视、雷达、导航、激光通讯、工农业生产的自动控制、遥控遥测到精密测量仪器、测绘制图自动化等各个方面都广泛使用锁相技术。随着集成电路技术的发展,逐步出现了集成的环路部件、通用单片集成锁相环路以及各种专用集成锁相环路,使得锁相环路逐渐变成了一个成本低,使用简便的多功能组件,这就为锁相技术在更广泛的领域应用提供了条件。锁相技术的应用概括起来主要有:模拟与数字信号的相干解调,频率合成,锁相稳频,数字信号中同步信号的提取,跟踪与测距,自动频率控制,相干载波的提取以及模拟调频(调相)信号的产生等等方面。

从70年代以来,国外使用锁相环路非常普遍,尤其是集成锁相环路发展十分迅速,主要方式是线性集成电路组成模拟环,有多功能的单片集成锁相环和集成化的环路部件的成品出售,使用起来极为方便。我国锁相技术发展也较快,目前,模拟锁相环、部分数字和全数字锁相环、单片集成锁相环都有采用。例如,在数字通讯

中的位同步环路是全数字化的。数字式频率合成环路中程序分频器和鉴相器多用数字电路组成,其余电路部件为模拟的,这属于部分数字锁相环。模拟电路不利于集成,电路可靠性和稳定性差,这些都影响着锁相环的进一步推广应用。为了改善锁相环路性能、提高可靠性、降低成本、扩大应用面,现在锁相环路正在朝着全数字化、集成化、多用途、高性能的方向发展。

频率合成技术是锁相环路应用的一个重要方面。它是从50年代开始发展起来的。随着通讯、雷达、测量仪器等技术的发展,对频率源的频率稳定性、频谱纯度、频率范围和波道数目提出了越来越高的要求。但是用一块晶体稳定一个频率的晶体振荡器,尽管频率稳定性和频谱纯度都能做得很高,然而它却不能满足多波道数的要求,而且晶体频率不能做得很高,从而限制了它在超高频或微波领域的应用。因此,人们迫切希望用一块或少量的晶体来稳定大量的工作频率,并把频段扩展到微波波段,这样就促进了“频率合成技术”的产生和发展。

由于锁相技术的发展和新的微波器件的不断出现,采用锁相式频率合成器为获得低噪声、大功率、高稳定度的微波频率源提供了宽广的前景。不足的是波道转换时间较长,单环频率合成器的频率间隔不可能做得很小,由环内噪声引起的输出相位抖动还比较大,抗震性能也比较差。但是在采用双环、多环与数字技术相结合以后,上述缺点得到了较好的克服。目前,锁相式频率合成器能做到波道间隔很小、波道转换时间很短和相位噪声很低。

随着集成电路和数字技术的发展,频率合成技术在通讯、雷达、遥控遥测、电视广播、测量仪器等领域已得到日益广泛的应用。在通讯设备中,频率合成器不但使工作频率精确、稳定,而且能使收、发两端实现无搜索、无微调的快速通讯;在雷达及电子对抗技术中,利用频率合成器可迅速而准确地变换频率,以避免敌人的侦察和干扰;用于测量仪器的频率合成器能提供高分辨力、低相位噪

声的信号,以适应各种精密测量的需要。

§ 1-3 锁相环路与频率合成器的分类和特点

一 锁相环路的分类和特点

锁相环路种类繁多,大致可将其分类如下:

1. 按输入信号分:

(1) 恒定输入环路——用于稳频系统。

(2) 随动输入环路——用于跟踪系统。

2. 按环路部件分:

(1) 模拟锁相环路——环路部件采用模拟电路。

(2) 取样锁相环路——将模拟锁相环路中普通鉴相器改为取样保持鉴相器就构成取样锁相环路。

(3) 数字锁相环路——环路部件采用数字电路。根据环路部件是部分或全部采用数字电路有部分数字环和全数字环。

(4) 集成锁相环路——环路部件采用集成电路。

锁相环路为什么能获得广泛的应用呢?这是因为它具有窄带滤波和频率跟踪等特点:

1. 窄带滤波特性

对输入信号的相位变化而言,环路可等效为一个以压控振荡器输出振荡频率为中心的窄带带通滤波器。窄带滤波特性的获得是由于当压控振荡器输出频率锁定到输入频率上时,位于信号频率附近的干扰成份将以低频干扰的形式进入环路,而绝大部分干扰会受到环路滤波器的低通特性的抑制,从而减少了对压控振荡器的干扰作用。因此,锁相环路好象一个带宽很窄的带通滤波器,可近似地认为锁相环路把低通滤波器的通带搬到高频上去了。由于低通滤波器一般由阻容元件组成(有时加入运算放大器),所以

带宽很容易做窄,于是高频带通滤波器也可以做得很窄了。例如,在几百兆赫的频率上,可以实现几赫的滤波,这是一般窄带滤波器(如 LC 或 RC 选择性滤波器)所无法做到的。

2. 频率跟踪特性

锁相环路不仅有带通滤波特性,而且压控振荡器的输出频率可以跟踪输入信号的频率变化,表现出良好的跟踪性能。通常有两种不同的跟踪环路,即调制跟踪环路和载波跟踪环路。适当设计环路带宽使输入信号的调制频谱在环路通带之内,那么环路输出信号的频率或相位能够很好地跟踪输入信号的频率或相位的调制变化,这是属于调制跟踪环路;若把环路的带宽做得很窄,使信号的调制频谱落在环路的带宽以外,这时,压控振荡器的输出频率只跟踪输入信号的载频漂移,这属于载波跟踪环路。

正是由于这两个优良的特性,锁相环路与功能相同的其它电路相比较具有以下优点:

1. 可以实现理想的频率控制。这是由于环路锁定时,环路输出无剩余稳态频差存在所致。

2. 可以不用谐振线圈而具有极高的选择性。例如,飞行器的发射频率 $f_r = 108\text{MHz}$,接收机噪声带宽 $B_L = \pm 3\text{Hz}$ 。则品质因数 Q 为

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f} = \frac{108 \times 10^6}{6} = 18 \times 10^6$$

3. 门限性能好。锁相环路用作调频信号解调器时,其门限性能比普通限幅—鉴频器要改善 5dB 左右。

4. 易于集成化与数字化。组成环路的基本部件易于采用模拟集成电路,环路实现数字化后,更易于采用数字集成电路。锁相环路的集成化、数字化为减小体积、降低成本、提高可靠性、实现多用途提供了有利条件。

二 频率合成器的分类和特点

频率合成可以有各种不同的方法,但大致可以归纳为两大类,即直接合成法和间接合成法。直接合成法就是利用一个或几个参考频率源,经过谐波发生器变换成谐波丰富的脉冲波,再经过混频、滤波后直接选出所需的频率。这种方法优点是频率转换速度快,输出相位噪声小,并能产生任意小的频率增量。其缺点是由于采用了大量的混频、倍频、分频和选频滤波装置,不仅体积大、成本高,而且输出纹波和寄生产物都难以抑制。间接合成法是用一个或几个参考频率源通过谐波发生器、混频和分频等产生大量的谐波或组合频率,然后使用锁相环路,把压控振荡器的频率锁定在某一谐波或组合频率上,由压控振荡器间接产生所需要的频率输出。这种频率合成器通常称为锁相式频率合成器。其主要优点是锁相环相当于一窄带跟踪滤波器,它的窄带跟踪特性很好地选择所需频率的信号,抑制寄生分量,而且避免了大量使用滤波器,十分有利于集成化和小型化。

现代锁相式频率合成器中采用的锁相环主要有两种基本型式:一种是脉冲取样锁相环(IGO环),这种环路的主要特点就在于用了取样保持鉴相器,环路其它部件还是模拟的。另一种为可变数字分频环(或称数字式合成器环),其主要特点是在环路中采用了可变数字分频器,鉴相器可以是取样保持型的,也可以是数字型的。此外,为了实际的需要,在环路中往往插入混频器,构成所谓混频环或者由上述几种环路结合在一起,构成所谓混合环。但是,无论环路如何组合,它们都不外乎是上述两种基本环路的变型或推广,从环路分析来看,环路中插入混频器、倍频器和分频器,只是相当于相位的加、减、乘、除而已,并没有什么本质的不同。

频率合成器是一种新型的振荡信号源,它与一般的振荡信号源相比较具有突出的优点:

1. 频率稳定度和准确度高

频率合成器由一个或多个晶体振荡的振荡频率作为基准频率,由这些基准频率产生一系列所需要的输出频率,其具有与晶体振荡器同样的频率稳定度和准确度。

2. 频率变换方便

频率合成器能够获得频率稳定度高的输出频率同时,利用 L、C 振荡器以方便变换频率。

3. 易于实现数字置定和显示频率

一般的振荡信号源多用连续度盘来置定和显示频率,而频率合成器则便于直接用数字显示频率,这不仅可提高频率的分辨力和频率置定的重复性,还为频率程序控制提供了很大方便。