

锁相与频率合成技术

张厥盛 曹丽娜

电子
书

社



GH

中等专业学校 规划教材
工科电子类

张厥盛 曹丽娜

SUOXIANG

YUPINLUHECHENG

锁相与频率合成技术

JISHU

电子科技大学出版社



TN911.8

Z16

441495

高等专科学校教材

锁相与频率合成技术

张厥盛 曹丽娜

电子科技大学出版社

• 1995 •

[川]新登字 016 号

内 容 简 介

本书讲述锁相环路和频率合成器的基本原理、性能、实际电路和应用。在介绍锁相环路原理与性能的基础上,着重说明目前应用最为广泛的锁相频率合成器的各种方案和各种单片集成频率合成器的产品,具有工程应用价值。专门有一章讲述相位噪声的概念与频率稳定度的频域和时域表征。最后一章对最新的直接数字式频率合成技术 DDS 作一概要的介绍。

本书供全国各类高校电子类专业(大专)作教科书使用,也可供有关工程技术人员参考。

D224/2
19

高等专业学校教材 锁相与频率合成技术

张厥盛 曹丽娜

电子科技大学出版社出版

(成都建设北路二段四号) 邮编 610054

成都市东方彩印厂印刷

四川省新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 10.125 字数 232千字

版次 1995年6月第一版 印次 1995年6月第一次印刷

印数 1—2000册

ISBN 7-81043-229-X/TN·7

定价:6.15元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978~1990年,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,“以全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”,作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想,组织我部所属的九个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据教育形势的发展和教学改革的需要,制计了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300多种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材的质量,做出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部

电子类专业教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材 1991~1995 年编审出版规划,由工科电子类应用电子技术专业(大专)教材编审委员会征稿并推荐出版,责编委郁伯康。

本教材由西安电子科技大学张厥盛主编,空军电讯工程学院苟彦新教授担任主审。

频率源是任何电子系统必不可少的,并且在很大程度上决定了系统的性能,可称之为电子系统的**心脏**。频率合成就是研制高性能频率源的一门技术。

目前,频率合成器的应用已十分广泛,使得从大量频率中选择某一工作频率变得极其精确又方便。从必要性方面看,频率合成技术的发展首先是由频谱资源日益紧张,要求系统工作频率的**准确度和稳定度**十分高;从可能性方面看,随着微电子技术和微机应用的发展,频率合成器已成为一个**高可靠性、低成本、控制灵活和使用方便**的多功能部件,大大促进了频率合成器性能的完善和应用的普及。

频率合成技术从早期的直接合成到 60 年代末 70 年代初发展的锁相频率合成,是一次技术上的飞跃,到 80 年代末 90 年代初出现直接数字频率合成又将完成一次新的技术飞跃。直接合成、锁相合成(间接合成)和直接数字合成三者构成了现代频率合成的完整体系,使频率合成技术日臻完善。目前,应用最为广泛的仍是锁相频率合成,这是本书讲述的主要对象。锁相频率合成技术涉及的技术领域较广,但**主要的基础即为锁相技术**。为适应上述技术的发展,在电子类专业中开设“锁相与频率合成技术”课程是十分必要的。本教材就是按照“应用电子技术”(大专)教材编审委员会审定的编写要求而编写的。

本课程的参考教学时数为 40~60 学时。全书强调锁相环路基础理论和集成锁相环频率合成器的实际应用两个方面。第一章绪论讲述频率合成的概念、方法和主要性能要求。第二、三章专门分析锁相环路的原理与性能,是本书的基础部分。第四章讲述锁相频率合成的各种方案,反映了当今频率合成的一般情况。第五章介绍了众多的集成部件和单片集成频率合成器,产品都是工程中应用十分广泛的,并介绍了它们的应用,对工程应用有重要的参考价值。第六章讨论频率合成器的相位噪声,它是标志频率合成器输出频谱质量的重要指标。

近几年,随着数字技术和微电子技术的发展,一种新的频率合成技术——直接数字频率合成 DDS 得到十分迅速的发展,新的产品大量出现并开始得到普遍应用,它的一些独特的优良性能引起了人们的关注。本书最后一章对此作专门的介绍。

编者张厥盛早在 1988 年与万心平合作编写了“锁相与频率合成技术”讲义,经多年教学实践后几经修改。本书是在上述基础上,根据“应用电子技术”(大专)教材编审委员会的要求重新编写的。全书由张厥盛主编,曹丽娜执笔第二、三、四章。

由于编者水平有限,难免有不妥之处,欢迎读者批评指正。

作者

1994 年 6 月

目 录

第一章 绪论

第一节 频率及其基本运算	(1)
一、频率的含意	(1)
二、频率的数学运算	(1)
三、频率与其他变量的相互转换	(2)
第二节 频率合成的基本方法	(2)
一、直接频率合成(DS)	(3)
二、锁相频率合成(或称间接频率合成 IS)	(5)
三、直接数字频率合成(DDS)	(7)
第三节 频率合成的主要性能指标	(8)
思考题与习题	(9)

第二章 锁相环工作原理

第一节 锁相环基本原理	(11)
第二节 鉴相器	(13)
一、鉴相器的工作原理	(13)
二、鉴相器的技术指标	(14)
第三节 环路滤波器	(15)
一、无源比例积分滤波器	(15)
二、有源比例积分滤波器	(16)
第四节 压控振荡器	(18)
一、特性与模型	(18)
二、压控振荡器的技术指标	(19)
第五节 环路相位模型和基本方程	(20)
一、相位模型	(20)
二、几点说明	(21)
第六节 锁相环工作过程	(21)
一、基本方程的物理含意	(21)
二、锁相环工作过程的定性分析	(22)
思考题与习题	(23)

第三章 锁相环性能及其应用

第一节 线性分析	(26)
一、线性化相位模型	(26)
二、传递函数	(27)

三、频率响应.....	(29)
四、稳定性.....	(32)
第二节 跟踪性能	(35)
一、暂态相位误差.....	(35)
二、稳态相位误差.....	(36)
第三节 捕获性能	(39)
一、相图原理.....	(39)
二、固定频率输入下的二阶环信号捕获.....	(41)
第四节 噪声性能	(44)
一、锁相环对输入白高斯噪声的线性过滤.....	(44)
二、门限与跳周.....	(47)
三、锁相环对 VCO 相位噪声的线性过滤	(47)
第五节 锁相环性能测试	(49)
第六节 锁相环路的应用	(51)
一、同步检波器.....	(52)
二、锁相鉴频器.....	(53)
思考题与习题	(54)

第四章 锁相频率合成器

第一节 单环锁相频率合成器	(57)
第二节 变模分频锁相频率合成器	(58)
第三节 多环频率合成器	(61)
第四节 小数分频合成器	(63)
第五节 频率合成器实例	(64)
思考题与习题	(69)

第五章 集成锁相环频率合成器

第一节 概述	(71)
第二节 集成锁相环部件	(73)
一、鉴相器.....	(73)
二、压控振荡器.....	(82)
三、分频器.....	(90)
第三节 中规模集成锁相环频率合成器	(96)
一、电路说明.....	(96)
二、应用举例.....	(99)
第四节 四位数据总线输入编程的大规模单片集成锁相环频率合成器	(101)
一、MC145145-1	(101)
二、MC145146-1	(104)

第五节 并行码输入编程的大规模单片集成锁相环频率合成器	(106)
一、MC145151-1	(107)
二、MC145152-1	(110)
第六节 串行码输入编程的大规模单片集成锁相环频率合成器	(113)
一、MC145155-1	(113)
二、MC145156-1	(115)
三、MC145157-1,MC145158-1	(117)
四、MC145159-1	(120)
第七节 BCD 码输入编程的大规模单片集成锁相环频率合成器	(125)
第六章 频率合成器的相位噪声	
第一节 相位噪声的基本概念	(127)
第二节 频率合成器的噪声来源	(129)
一、振荡器噪声.....	(130)
二、触发器噪声.....	(131)
三、混频、分频和倍频对相位噪声的作用	(133)
第三节 锁相环路对噪声的线性过滤	(133)
第四节 频率稳定度的表征	(136)
一、频率稳定度频域表征.....	(136)
二、频率稳定度时域表征.....	(137)
第七章 直接数字式频率合成 DDS	
第一节 原理	(140)
第二节 组成	(142)
一、相位累加.....	(142)
二、相位与幅度的变换.....	(145)
第三节 性能	(147)
第四节 混合方案	(150)
一、DDS/DS 混合方案	(150)
二、DDS 激励 PLL 混合方案	(151)
三、PLL 内插 DDS 混合方案	(152)

第一章 绪论

第一节 频率及其基本运算

一、频率的含意

在电子学中，“频率”和相位、幅度等一样，通常被看作是电流、电压等变量的一个参数。若在一给定的时间间隔之内，电流或电压是周期性变化的，那么这个周期信号就有一个瞬时频率，它定义为在给定的时间间隔之内两个重复点之间时间的倒数。如果信号是等幅的正弦波，其瞬时幅度和相位之间有对应关系，则频率是相位对时间的导数，即

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (1-1)$$

式中 $\omega(t)$ 为瞬时角频率， $\theta(t)$ 为瞬时相位。反之，相位为角频率对时间的积分，即

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau \quad (1-2)$$

从傅利叶变换的角度看，真正的单一频率 ω 是指持续时间为无限大的正弦波。一个持续时间有限的正弦信号，它的频谱必定有一个宽度。然而，只要这个频谱的宽度（即信号能量集中的频率范围）比所讨论的频率分辨率窄得多，可近似地认为是单一频率。因此，基于傅利叶变换的频谱分析方法仍是工程中常用的，利用它，可以分析滤波器对它的过滤等等。

在频率合成和锁相技术中，需要把频率和相位本身作为一个状态变量进行专门的研究。要研究对频率的数学运算，频率与其他参量之间的相互转换以及电路系统对相位的传递等等，这些新的概念，对于掌握频率合成和锁相技术是很重要的。

二、频率的数学运算

频率合成过程中，要求对频率进行加、减、乘、除的基本运算。加法和减法用混频器实现，乘法运算用倍频器，除法运算用分频器。它们都需要配合相应的滤波器。

1. 混频器

混频器是用非线性器件组成的，当两个不同频率的信号作用到非线性器件上之后，会产生所需的和频与差频信号，同时也会产生许多不需要的其他非线性产物。

设非线性器件特性用泰勒级数表示为

$$u = a_0 + a_1 i + a_2 i^2 + \dots + a_n i^n + \dots \quad (1-3)$$

在两个不同频率信号的作用下，

$$i = A \cos(\omega_1 t + \varphi_1) - B \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (1-4)$$

将式(1-4)代入式(1-3)的 $a_1 i$ 项,得到频率为 ω_1 和 ω_2 的信号放大输出;代入 $a_2 i^2$ 项,得到频率为 $\omega_1 \pm \omega_2$ 的和频与差频信号输出,完成频率的加法和减法运算;代入 $a_3 i^3$ 项,得到频率为 $m\omega_1 \pm n\omega_2$ (其中 $m+n=k$) 的非线性产物,这些都是有害的成分。

用混频器作频率的加减法运算时,需用带通滤波器滤出所需的和频或差频分量,抑制其他有害分量,在此尤其要密切注意以上有害成分的影响。在设计波段工作的频率合成器时,这是一个比较困难的问题。

2. 倍频器

一般非线性器件都可以做倍频器,通过最佳设计,可以产生某些需要的谐波成分。根据需要,倍频器的输出频率可以是输入频率的某个谐波,也可以是输入频率各次谐波都有的“梳状”频率。在较低的频率上,全波整流器可以作倍频器。调谐在输入频率谐波上的丙类放大器也可以做倍频器。倍频器中常用的非线性器件是阶跃恢复二极管,它会同时产生大量的谐波,需用滤波器来选取所需要的成分。

3. 分频器

分频器的类型很多,有开关型分频、强迫同步型分频、再生式分频等等。但是,目前使用最为广泛的是数字分频器。数字分频器用二进制的数字电路构成,可以做成分频比为任意值的固定分频器、变模分频器、可编程分频器以及小数分频器等,这些都将在本书有关的章节中阐述。

三、频率与其他变量的相互转换

在频率合成的过程中,除了需要对频率进行上述的基本运算之外,另一个基本过程就是要与其他变量相互转换。

频率与相位之间的关系如式(1-2)和(1-1),它们之间的相互转换不难用微分和积分电路来完成。

利用鉴频器可以把频率转换成电压。利用压控振荡器可以把电压转换成频率。利用鉴相器可以把相位转换成电压。利用相位调制器可以把电压转换成相位。

第二节 频率合成的基本方法

随着电子技术的发展,要求信号的频率越来越准确与稳定,一般振荡器已不能满足要求,于是出现了高准确度和高稳定度的晶体振荡。但晶振的频率是单一的或只能在一个极小的范围内微调。然而,在通信、雷达、宇航、仪表等应用领域,往往需要在一个频率范围内提供一系列高准确和高稳定度的频率,这就需要应用频率合成。

频率合成是指从一个高稳定和准确的参考频率,经过各种技术处理,生成大量离散的频率输出。这里的技术处理方法,可以是传统的用硬件实现频率的加、减、乘、除基本运算,可以是锁相技术,也可以是各种数字技术和计算技术;这里的参考频率可由高稳定的参考振荡器(一般为晶体振荡器)产生;所生成的一系列离散频率输出与参考振荡器频率有严格的比例关系,且具有同样的准确度和稳定度。

频率合成的基本方法有以下三种。

一、直接频率合成(DS)

直接频率合成是最早的频率合成方法,它是谐波发生器、滤波器、倍频器、分频器和混频器的组合,由一个或多个参考频率来合成某个特定的频率。因为双极型晶体管有指数型的基发电压特性,宜于用作谐波发生器。

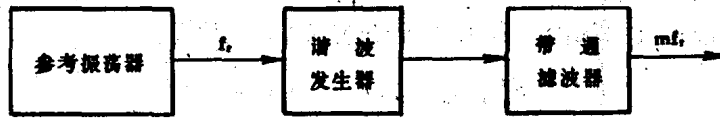


图 1-1 直接频率合成器

用谐波发生器的一种方法如图 1-1。将滤波器调谐到所需输出频率上就可以得到需要的频率。这种方法要求选择性很高的滤波器。可采用的另一种方法是多振荡器法。振荡器通常比带通滤波器容易做。图 1-2 是由 18 个晶体振荡器产生 99 个离散频率的方法。一个开关从间隔为 1kHz 的、覆盖频率范围从 1~9kHz 的 9 个振荡器中选择一个,另一个开关覆盖频率范围为 10~90kHz,间隔为 10kHz,而后两信号一起加到混频器,带通滤波器选择混频器两输出频率中较高的一个。

直接频率合成器设计中主要考虑的一点是混频比

$$r = \frac{f_1}{f_2} \quad (1-5)$$

式中 f_1 和 f_2 是加到混频器的两输入频率。如果混频比太大或太小,两输出频率将靠得太近,很难用滤波器把其中的一个信号滤掉。

例如,两混频输入频率是 100MHz 和 1MHz ($r=100$),混频器输出频率将为 99MHz 和 101MHz。要把这两个频率中的一个滤除需要非常复杂的滤波器。

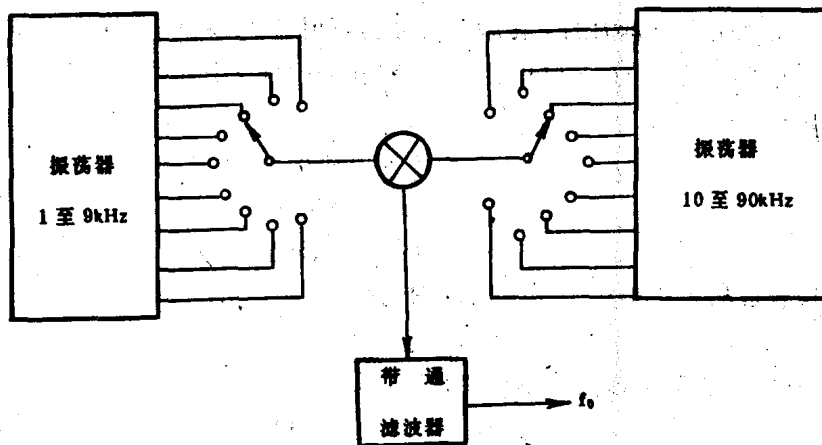


图 1-2 双十进直接频率合成器

用偏移频率的办法可以降低对滤波器的要求。下面要讲的另一种直接合成方法就采用这种途径。

图 1-3 是直接频率合成器中常用的一种直接合成模块。这种方法称为双混频分频法。模块所需完成的是输入频率 f_i 与某一可选取的频率 $f^*/10$ 相加,为使模块内的混频器工作在合适的混频比,以保证相加输出信号的频谱纯度,这里选择了两个辅助频率 f_1 和 f_2 ,且满足 $f_i + f_1 + f_2 = 10f_i$ 。它的工作过程是这样的。输入频率 f_i 和辅助频率 f_1 相混频,用带通滤波器选出和频 $f_i + f_1$ 。这个频率与可用开关选择的 $f_2 + f^*$ 相混频,这里的 $f_2 + f^*$ 可用其他任何方法得到。第二个混频器输出包括和频 $f_i + f_1 + f_2 + f^*$ 与差频 $f_i + f_1 - f_2 - f^*$,出现在带通滤波器输出端的只是和频,经过除 10 分频后得到

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{1}{10}(f_i + f_1 + f_2 + f^*) \\ &= f_i + f^*/10 \end{aligned} \quad (1-6)$$

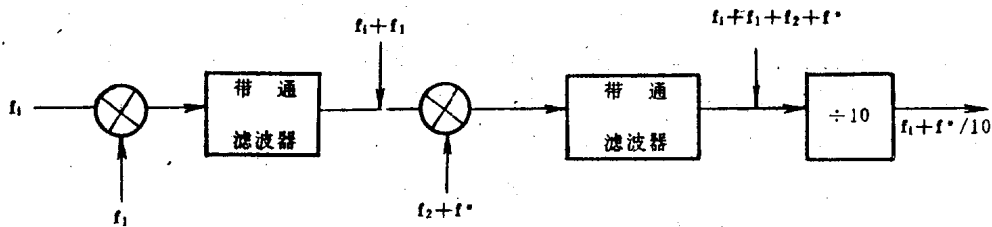


图 1-3 双混频—分频模块

双混频分频模块使输入频率增加了一个可用开关选择的频率增量 $f^*/10$ 。将双混频分频模块级联起来,可以形成具有任意分辨力的频率合成器。双混频分频方法的另外一个优点是,每一个模块中频率 f_1 、 f_2 和 f_i 可以相同,那么所有模块都可用一样的组件。

若仅从理论上考虑,双混频分频模块如此复杂是不必要的,因为用一个混频器和带通滤波器就可以产生输出频率 $f_i + f^*/10$ 。图 1-3 方法的主要优点是比较实用的,它可以得到较好的混频比(从而放宽对滤波指标的要求),并且可在级联每一级中用相同的带通滤波器。

例如 三位数分辨力的直接频率合成器可用三个双混频分频模块来实现。每个十进位开关选择 10 个频率 $f_2 + f^*$ 中的一个。此例中,第三个模块的输出在 10 分频器之前取出。例如,选择

$$\begin{aligned} f_i &= 1\text{MHz} \\ f_1 &= 3\text{MHz} \\ f_2 &= 6\text{MHz} \end{aligned}$$

用三模块合成器可产生从 10~19.99MHz 之间的频率(以 10kHz 为增量)。因为

$$f_i + f_1 + f_2 = 10f_i \quad (1-7)$$

在最后一个 10 分频之前的输出频率是

$$f_0 = 10f_i + f^* + \frac{f_2^*}{10} + \frac{f_1^*}{100} \quad (1-8)$$

若 f^* 的增量是 1MHz,则 $f_1^*/100$ 即提供所需要的 10kHz 频率增量。在最后一个 10 分频器之前取输出,是因为这里提供正弦波输出。分频器输出的则是方波波形。例如,若需要 14.86MHz 的频率, f_1^* 是 6MHz, f_2^* 是 8MHz, f^* 是 4MHz。

直接频率合成能实现快速频率变换、几乎任意高的频率分辨力、低相位噪声以及所有方法中最高的工作频率,直接频率合成比将要讲述的其他两种合成技术需要多得多的硬设备(振荡器、混频器和带通滤波器)。这些对硬设备的需要,使得直接合成器做得较为庞大和昂贵。直接合成技术的另一个缺点是,它的输出端会出现无用(寄生)频率。频率范围越宽,输出端可能出现的寄生分量就越多。这些缺点必然大大抵消了直接合成在多功能、速度以及灵活性等方面的优点。

二、锁相频率合成(或称间接频率合成 IS)

直接合成所固有的那些缺点,在应用锁相环路(PLL)的频率合成(常称为间接合成)中就大大减少了。基本的锁相频率合成的框图如图 1-4 所示。当 PLL 锁定时,相位检波器两输入的频率是相同的。即

$$f_r = f_s \quad (1-9)$$

VCO 输出频率 f_0 经 N 次分频得到的

$$f_s = \frac{f_0}{N} \quad (1-10)$$

所以输出频率是参考频率的整数倍,即

$$f_0 = Nf_r \quad (1-11)$$

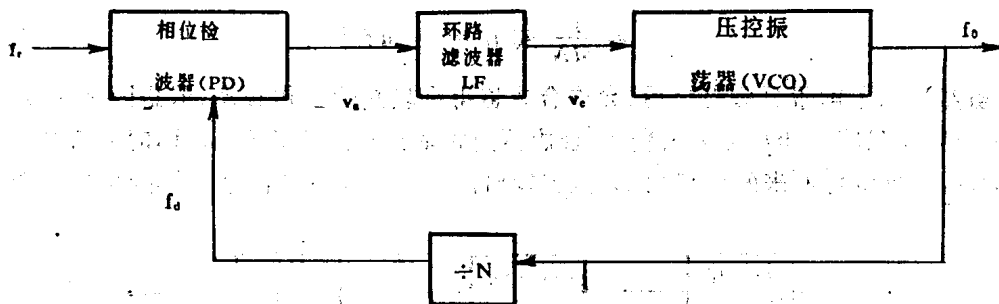


图 1-4 基本 PLL 合成器框

这样,环中带有分频器的 PLL 就提供了一种从单个参考频率获得大量频率的方法。如果用一可编程分频器来实现分频比 N ,就很容易按增量 f_r 来改变输出频率。带有可编程分频器的 PLL 为合成大量频率提供了一种简便的方法,所有这些频率都是参考频率的整数倍。然而,这种方法也有它的问题。

问题之一是,从式(1-11)可见频率分辨力等于 f_r ,即输出频率只能按参考频率 f_r 那样的增量来改变。为了提高合成器频率分辨力就必须将 f_r 减小,然而这与转换时间短的要求是矛盾的。虽然转换时间取决于 PLL 的非线性性能,精确的表达式目前还难以导出,工程上常用的经验公式为

$$t_s = \frac{25}{f_r} \quad (1-12)$$

转换时间大约需要 25 个参考频率周期。所以分辨力与转换速度成反比。目前,采用跳频技术的卫星通信系统的技术要求是:频率分辨力等于 10Hz,转换时间小于 $10\mu s$,因为上面经验公式预示的转换时间是 2.5 秒,显然简单的 PLL 频率合成器是不能同时满足这两个

技术要求的。

图 1-4 基本 PLL 合成器的另一个问题是 VCO 的输出是直接加到可变分频器上的,而这种可编程分频器的最高工作频率可能比所要求的合成器工作频率低得多。因此,在很多应用场合基本 PLL 合成器是不适用的。

固定分频器的工作频率明显高于可变分频器,超高速器件的上限频率可达千兆赫以上。若在可变分频器之前串接一固定分频比的前置分频器如图 1-5 则可大大提高 VCO 的工作频率。

设前置分频器的分频比为 M , 则当环路锁定时

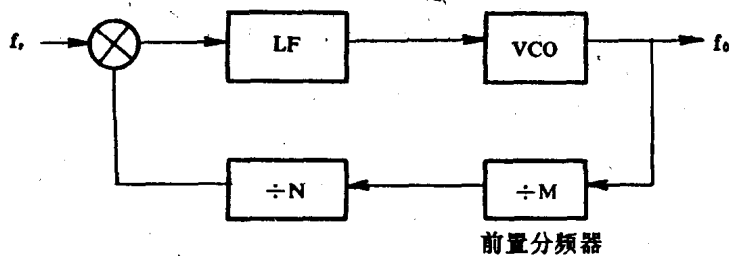


图 1-5 有前置分频器的 PLL 合成器

$$f_r = \frac{f_o}{MN} \text{ 或 } f_o = N(Mf_r) \quad (1-13)$$

虽然采用了前置分频器之后,允许合成器得到较高的工作频率,但是因为 M 是固定的,输出频率只能以 Mf_r 为增量变化,合成器的频率分辨力下降了。若同时降低参考频率到 f_r/M ,虽可维持原来的分辨力 f_r ,但转换时间又加长了 M 倍,总之不能从根本上得以改善。

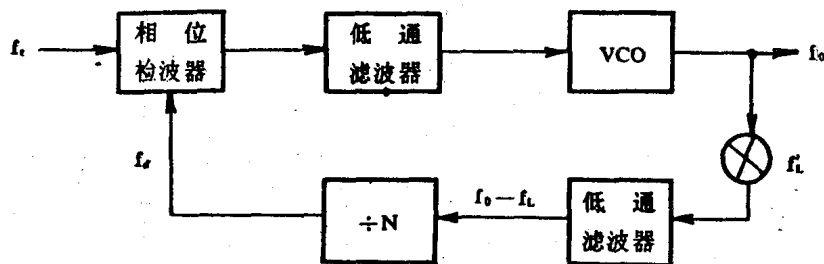


图 1-6 下变频 PLL 合成器

避免可编程分频器工作频率过高的另一个途径是,用一个本机振荡器通过混频将输出频率下移。图 1-6 就是一个下变频合成器的框图。混频器后面的低通滤波器用于滤除混频输出的和频分量和其他非线性产物。分频器输出频率为

$$f_r = f_r = \frac{f_o - f_L}{N} \quad (1-14)$$

因此

$$f_o = f_L + Nf_r \quad (1-15)$$

这方法的主要缺点是增加了复杂性并加大了体积,由混频器带来寄生分量的可能性也加

大了,反馈通路中滤波器的相位延迟还可能对环路性能带来有害的影响。从根本上说,这是借用了直接式锁合的技术手段,因而必然带来它的有害影响。

总之,锁相环频率合成器的频率分辨力取决于 f_s ,为提高频率分辨力应取较低的 f_s ,而转换时间 t_c 也取决于 f_s ,为使转换时间短应取较高的参考频率 f_s 。这两者是矛盾的。另外,可变分频器的频率上限与合成器的工作频率之间也有矛盾。上述前置分频和下变频的简单方法并不能从根本上解决以上的矛盾。为解决上述问题,近年来锁相频率合成器的研究已有了重大进展,出现了诸如变模分频(也称吞脉冲技术)PLL合成器、小数分频PLL合成器以及多环锁相合成器等,它们的性能比基本的PLL合成器有了明显的改善,满足了各类应用的需求。这些将在第四章中详细阐述。

三、直接数字频率合成(DDS)

完成直接数字频率合成(DDS)的办法,或者是用一通用计算机或微计算机求解一个数字递推关系式,或者是在查阅的表格上存储正弦波值。现代微电子技术的进展,已使DDS能够工作在高约几百MHz的频率上。这种合成器的体积小、功率低,并且能以实际上是即时的、相位连续的频率变换,给出非常高的频率分辨力。

用求解线性递推关系式的办法来产生正弦波,至少存在两个问题。在一个有限的周期(非线性振荡)出现之前,噪声会增长。还有,用于表征系数的有限字长给频率分辨力加上了限制。由于这两个原因,今天人们乐于用直接查表法。一种直接查表法是在每个正弦波周期内输出同样的点数,并且通过调整数据输出率以改变输出频率。用这方法要获得高的频率分辨力是较困难的。如果要有高的频率分辨力通常要用改进的查表法。这里要讲的就是后一种方法。它的基本思想是在存储器存入正弦波的 N 个均匀间隔样品,然后以均匀速率把这些样品输出到数模变换器,将其变换成模拟信号。最低输出频率的波形会有 N 个不同的点。同样的数据输出速率,但存储器中的值每隔一个值输出一个,就能产生二倍频率的波形。以同样的速率,每隔 k 个点输出就得到 k 倍频率的波形。频率分辨力与最低频率 f_L 一样。存在一个上限频率,它取决于存储器中所存的点数。理论上只要输出正弦波的两个样品,用模拟滤波法在D/A变换器的输出端就可恢复出基频。通常最高频率信号用四个或更多个点,这样对输出端模拟滤波器的要求可以容易些。完整的DDS结构示于图1-7。系统由相位累加器(它只是一个数字累加器)、只读存储器、参考振荡器、D/A变换器和低通滤波器组成。为产生最低频率,每个参考周期对相位累加器加1,输出查阅表上的下一个值。为输出比最低频率快 k 倍的频率,每次在相位累加器中加 k ,从查阅表得到相应的值即可输出。

以上以正弦波输出说明这类查表法DDS的原理,事实上存储器内可存入任意波形的均匀间隔样品,从而由DDS生成任意波形的输出。有关DDS的工作原理、组成和性能分析将在第七章中专门讨论。

从原理上讲,应用数字技术构成的DDS一定存在相位量化噪声,应用了D/A变换器又必然存在幅度量化噪声,因而噪声问题就成为DDS研究和应用中极为重要的课题,第七章中将专门讨论DDS的噪声分析。

DDS的主要优点是分辨力高、容易做到极低的频率,几乎是即时的频率转换以及成

本低、控制灵活等。它的主要缺点是受限于器件可用的最高时钟频率,输出频率上限不能太高。若设计不注意,由相位量化噪声和幅度量化噪声所形成的总输出噪声电平可能很高。这两项主要缺点长期以来阻碍 DDS 的发展与实际使用。近几年来随着超高速数字电路的发展以及对 DDS 的深入研究,DDS 的最高工作频率以及噪声性能已接近并达到锁相频率合成器相当的水平,各种 DDS 产品(包括单片集成电路)相继出现,应用于电子计量仪表、通信机等,在频率合成技术领域内正在引起一场革新,应该引起我们的关注。

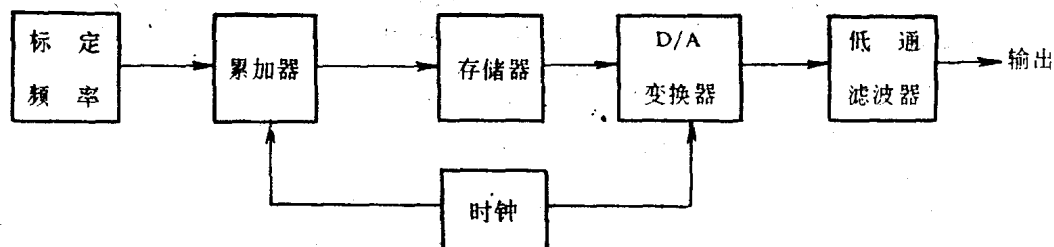


图 1-7 直接数字频率合成 DDS

以上三种基本方法是现代频率合成的技术基础,在性能上各有其特点、相互之间不能取代而是很好的补充。在实际应用中,可以根据性能要求,组合应用这些基本方法,从而得到性能更好的频率合成器。

第三节 频率合成的主要性能指标

频率合成器的性能需一系列指标来表征。但由于不同用途的合成器,其性能差异很大,例如通信机中的频率合成器与作为标准信号源的仪器用频率合成器就有很大的不同,因此难于给出完整的指标系列及其数值范围,这里仅介绍一些必不可少的基本指标的含意。

(一) 频率范围

频率范围指频率合成器输出最低频率 f_{0min} 和输出最高频率 f_{0max} 之间的变化范围,也可以用覆盖系数 $k=f_{0max}/f_{0min}$ 表示。如果覆盖系数 $k>2\sim3$ 时,整个频段可以划分为几个分波段。在频率合成器中,分波段的覆盖系数一般取决于压控振荡器的特性。

要求频率合成器在指定的频率范围之内,所有指定的离散频率点上均能正常工作,且均能满足其他性能指标。

(二) 频率分辨力

频率合成器需在指定的频率范围内产生大量离散的频率。频率分辨力是指两相邻频率点之间的间隔,故也称为频率间隔。不同用途的频率合成器的分辨力要求相差很大。例如 VHF 调频通信机的分辨力一般为 25kHz、12.5kHz 或 5kHz。HF 单边带通信机的分辨力常见的为 100Hz,也有 10Hz 甚至 1Hz 的。作为标准信号源的合成器,则希望有尽可能精细的频率分辨力,要求 1mHz 以下也是可能的。

(三) 频率转换时间

频率转换时间是指频率合成器从某一频率转换到另一个频率并达到稳定所需要的时

间。对于锁相频率合成器而言主要就是环路的锁定时间。若方案中有人工或自动频率搜索装置,则搜索时间也应包含在内。前面已经提到,直接合成和直接数字合成的转换时间是极短的,锁相合成的转换时间大致为参考信号周期的 25 倍。一般要求频率合成器的转换时间低于几十毫秒,而在时分多址和跳频体制的通信系统中,则对转换时间提出极高的要求,可能要达到微秒的量级。

(四)频率准确度和稳定度

频率准确度是指频率合成器的实际输出频率偏离标称工作频率的程度。频率稳定度是指在一定的时间间隔内,合成器输出频率变化的大小。

频率准确度与稳定度之间既有区别有也联系,只有稳定了才能准,故通常将工作频率相对于标称值的偏差也计在不稳定偏差之内,只提频率稳定度也就可以了。

频率稳定度可分为长期稳定度、短期稳定度和瞬间稳定度。但其间无严格的界限。长期稳定度指一年、一月内的频率变化,主要由晶体和元器件老化所决定。短期稳定度是指日、小时内的频率变化,主要因素是内部电路参数的变化,外部电源波动、温度波动及其他环境因素。瞬间稳定是指秒、毫秒间隔内随机的频率变化,主要因素是干扰与噪声。瞬稳可用时间域描述,用某一时间区域内取样的“频偏均方差”(或“相偏均方差”)来定义,有“真方差”、“阿伦方差”等;也可以用频域描述,即表现为相位噪声频谱,用功率谱密度表示。

(五)频谱纯度

影响频率合成器频谱纯度的因素主要有两个,一是相位噪声,二是寄生干扰。

相位噪声即是瞬稳的频域表示,在频谱上呈现为主谱两边的连续噪声频谱,如图 1-8 所示。相位噪声的大小可用频率轴上距主谱 f 处的相位功率谱密度来表示。相位噪声是频率合成器质量的重要标志,锁相频率合成器相噪的主要来源是参考振荡器和压控振荡器,环路参数的设计也有重要的影响,有关的问题将在本书第六章分析。

寄生干扰是非线性部件所产生的,其中最严重的是混频器,寄生干扰表现为一些离散的频谱,如图 1-8 所示。混频器中混频比的选择以及滤波器的性能对于寄生干扰是至关重要的。

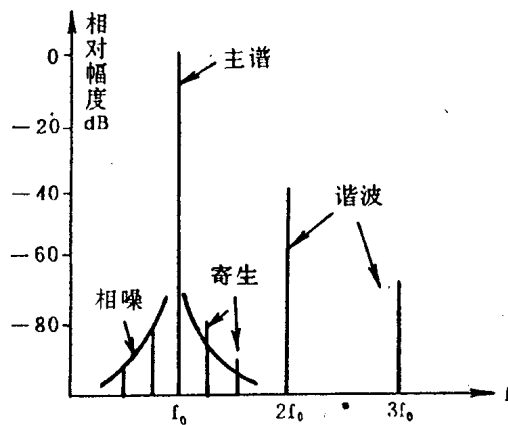


图 1-8 频率合成器的频谱

思考题与习题

- 1-1 如何用硬件实现频率的加、减、乘、除等基本运算?
- 1-2 什么叫频率合成技术?
- 1-3 频率合成的基本方法有哪几种? 试比较它们的优缺点。