

合成频率源 工程分析与设计

高树廷 高峰 徐盛旺 刘永智 编著

兵器工业出版社

序 言

随着合成频率源技术的发展,相关书籍也多了起来,但是从工程角度来描述的书籍很少。作者从事电子电路和频率源的研发工作 40 多年,积累了很多经验,现从工程设计出发,分析合成频率源的各项技术指标、设计方法及设计调试时应注意的事项,汇总成书,供从事频率源工程的技术人员参考。

本书共分 12 章,第 1 章到第 5 章为频率源综述、合成方法、合成原理分析及工程设计,设计举例等,给出各种合成频率源的系统分析及设计方法。第 6 章分析频率源常用电路及这些电路的设计和选用。第 7 章到第 10 章为合成频率源主要技术指标分析及设计,对频率稳定度、低相噪设计、跳频时间分析及合成器的快速捕获设计和低杂散设计等进行了详细阐述。第 11 章和第 12 章为频率源工程分析,即对频率源电磁兼容设计、工程设计注意事项和工程上常见问题做了分析论述。其中第 6 章的电路隔离和第 9 章的快速捕获方法都是近年总结出来的新方法,是其他书中没有的。

本书作者都从事电路系统和频率源研发工作几十年,这其间在中国兵器工业第二〇六研究所领导的指导和关怀下与很多同事团结奋斗取得了目前的成绩,尤其是所领导的支持,使该书得以顺利出版。在此向曾合作的同事岳峻屹、刘景琴、高文英、张春荣、潘丽娟、蒲小兵、刘逸平、雷国忠、李跃峰、徐文利、康颖、刘洪升等深表感谢。另外,感谢近几年来成都联帮微波通信工程有限公司的王联旭总经理及吴嗣福、黄全辉、徐浪平、李东、万志军等员工们的大力协助。由于作者水平所限,本书尽管经过几次校订,仍难免还有疏漏和不妥之处,欢迎读者予以指正。

高树廷

2008 年 6 月

前 言

全书共分12章。第1章为频率源综述；第2章为频率源合成方法；第3章为频率源合成原理分析及工程设计。这3章主要对频率源系统的设计进行分析综述。第4章为各种合成频率源的工程设计；第5章为间接式模块化雷达频率源。这两章主要阐述各种具体的频率源设计及其指标要求。第6章为频率源电路与电路系统分析与设计；第7章为频率源相位噪声分析测量及低相噪设计；第8章为频率源时域频率稳定度分析及测量技术；第9章为频率源快速捕获及跳频时间分析测量；第10章为合成频率源低杂散设计和其他技术指标分析。这5章对频率源常用电路和主要技术指标的设计进行了详细分析，并给出设计方法。第11章为频率源电磁兼容设计；第12章为频率源工程设计。这两章主要叙述频率源工程设计方法和应注意的问题。

本书集中四十多年的工程设计经验，对工程设计和工程中遇到的问题进行了分析总结。本书中的电路隔离、锁相环的快速捕获方法等内容都是其他书所没有的，所以是一本从事频率源专业的工程技术人员难得的一本参考书。书内重物理概念分析，重解决技术问题分析。作者希望能给搞频率源专业的技术人员有所帮助，但水平有限，难免有错，欢迎指正。

目 录

第1章 频率源综述	1
1.1 频率源简介	1
1.2 合成频率源基本原理	3
1.3 频率源的发展和重要性	5
1.4 频率源关键技术和工程设计要点	5
1.5 总结	5
第2章 频率源合成方法	6
2.1 非相干合成法	6
2.2 漂移对消法	6
2.3 倍频、分频、混频法	7
2.4 谐波发生器加开关滤波组件法	7
2.5 直接模拟合成法	7
2.6 直接数字合成法	8
2.7 模拟锁相环合成法	8
2.8 混频锁相环合成法	8
2.9 复杂锁相环合成法	9
2.10 数字锁相环合成法	9
2.11 小数分频锁相环合成法	10
2.12 取样锁相环合成法	11
2.13 谐波混频锁相环合成法	11
2.14 注入锁相环合成法	11
2.15 锁定 YIG 振荡器合成法	12
2.16 总结	12
第3章 频率源合成原理分析及工程设计	13
3.1 直接模拟式合成频率源	13
3.2 直接数字式合成频率源	14
3.3 间接模拟式合成频率源	15
3.4 间接数字式合成频率源	21
3.5 设计注意事项	23
3.6 总结	24

第4章 各种合成频率源工程设计	25
4.1 S波段间接模拟式雷达用频率源	25
4.2 单片集成数字锁相环的应用	29
4.3 低相噪数字锁相环频率源	39
4.4 C波段多环数字锁相频率源设计	41
4.5 S波段直接式气象雷达频率源	45
4.6 气象雷达频率源设计	48
4.7 DDS 频率源设计	52
4.8 DDS 与直接式频率源设计	55
4.9 DDS 与数字锁相环相结合频率源设计	58
4.10 超宽带直接式频率源设计	62
第5章 间接式模块化雷达频率源	65
5.1 雷达频率源	65
5.2 间接式雷达频率源方案分析	67
5.3 间接式雷达频率源通用方案论证	69
5.4 间接式雷达频率源模块组设计	72
5.5 间接式模块化雷达频率源方案介绍	73
5.6 模块的技术方案和主要技术指标	75
5.7 模块化雷达频率源研制情况	79
第6章 频率源电路与电路系统分析与设计	81
6.1 概述	81
6.2 电路与电路系统分析	81
6.3 电路之间隔离设计与分析	83
6.4 单片放大器电路分析与设计	87
6.5 混频器电路分析与设计	91
6.6 倍频器电路分析与设计	95
6.7 谐波发生器电路分析与设计	98
6.8 选频电路分析与设计	101
6.9 鉴频器电路分析与设计	105
6.10 压控振荡器电路分析及选择	110
6.11 其他常用电路分析及选择	115
第7章 频率源相位噪声分析测量及低相噪设计	119
7.1 频率源相位噪声分析	119
7.2 频率源相位噪声测量技术	133
7.3 相位噪声对电路系统的影响	140

7.4	用 HP3048A 相位噪声测试系统测量相位噪声	145
7.5	总结	158
第 8 章	频率源时域频率稳定度分析及测量技术	160
8.1	概述	160
8.2	时域频率稳定度的分析	164
8.3	频率稳定度的测量技术	173
8.4	直接用数字式频率计测量短期频率稳定度	178
8.5	差频周期法测量短期频率稳定度	182
8.6	短期频率稳定度测量中的几个问题	186
第 9 章	频率源快速捕获及跳频时间分析测量	189
9.1	合成频率源跳频时间分析	189
9.2	锁相式频率源的捕捉方法及跳频时间分析	192
9.3	间接式雷达频率源的跳频控制及快速捕获方法	199
9.4	模拟锁相环用数字鉴频器实现捕获	201
第 10 章	合成频率源低杂散设计和其他技术指标分析	205
10.1	频率源输出杂散	205
10.2	频率源输出频段	208
10.3	频率源频率步进	208
10.4	频率源输出功率	208
第 11 章	频率源电磁兼容设计	209
11.1	概述	209
11.2	电路系统中的接地设计	210
11.3	电路系统中的馈电设计	215
11.4	电路系统的屏蔽设计	217
11.5	电路中信号传输设计	222
11.6	电路中的印制版设计	223
11.7	电路系统的电磁兼容设计提纲	224
第 12 章	频率源工程设计	226
12.1	一般合成频率源的设计步骤	226
12.2	复杂合成频率源工程设计	226
12.3	频率源工程设计中的常见问题	230
参考文献		236

频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用
频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用
频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用
频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用
频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用
频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用
频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用
频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用
频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用
频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用	频率源技术及应用

第1章 频率源综述

频率源技术是一项技术难度很大的先进电路技术，它的好坏直接影响雷达、导航、通信、空间电子技术及仪器、仪表等的性能指标。主要发达国家掌握这项技术，研制出性能好的电子系统，它们的合成信号源、频谱分析仪、网络分析仪等高价向我国内倾销。这些仪表的关键技术是有一个好的频率源。国内早在 20 世纪 70 年代初，有关单位就展开了频率合成技术的研制工作，并取得了一定成绩，但因技术难度大和其他原因，早期研究的几个单位都没有坚持下来。到了 80 年代国内整机单位因工程需要，都纷纷成立了自己的研制班子，经过了 20 多年的奋斗，有些单位的研制班子变动多次，至今我国频率源技术、频率综合技术与发达国家相比，相差较远。这足以证明频率源技术的难度，也说明了频率源技术的发展还应受到更多重视。

1.1 频率源简介

频率合成是合成频率源的主要方法，是由一个或者几个基准频率产生出一个或者多个新频率的电子系统。早期的频率合成是控制一组谐振器或者晶体振荡器，随着电子技术的发展出现相干合成和非相干合成、直接合成和间接合成等多种方法。同时频率合成的形式越来越复杂，价值也很昂贵，技术指标的不断提高，甚至难以实现。

频率源也是用来提供各种信号的电子设备。自激振荡器可认为是一种简单的频率源，晶体振荡器也是一种频率源，随着电子技术的发展，要求频率源的频率稳定度越来越高，即相位噪声越来越低。所以过去的自激振荡器的频率源远远不能满足要求，它们的频率稳定度一般在 10^{-5} 以上。目前常说的频率源往往指的是合成频率源，即频率源，该频率源有如下特点：

- (1) 输出频率为步进式，不是连续的，目前最小频率步进能做到微赫兹；
- (2) 输出频率稳定度高，尤其短稳，可达 10^{-12} 量级；
- (3) 自动化、智能化水平高，使用灵活方便。

1.1.1 频率源类别及优缺点

频率源可分为两大类，自激振荡源和合成频率源。自激振荡源是大家熟知的，常见的自激振荡源有晶体振荡器、腔体振荡器、介质振荡器、压控振荡器、YIG 振荡器和波形产生器等。这些源的输出频率范围、调谐带宽、近端相噪等各有不同，表 1.1 列出了它们的区别和特点。

表 1.1 自激振荡器性能比较

项目	晶体振荡器	腔体振荡器	介质振荡器	压控振荡器	YIG 振荡器	波形产生器
频率范围	1GHz 以下	几百兆赫以上	几百兆赫以上	全频段	1GHz 以上	几百兆赫以下
调谐带宽	窄	较窄	窄	较宽	宽	宽
近端相噪	好	一般	较好	差	较好	—

合成频率源是 20 世纪 70 年代后发展起来的新型频率源，技术含量高，目前被广泛应用在现代电子系统中。合成频率源主要优点是频率稳定度高，尤其短稳也就是相位噪声低，甚至比原子钟的相噪还低，使用灵活、控制方便、性能优越。缺点是造价高、技术难度大。合成频率源一般可分为四大形式，即直接模拟式频率源、直接数字式频率源、间接模拟式频率源和间接数字式频率源，它们的优缺点见表 1.2。

表 1.2 合成频率源性能比较

项目	相噪	杂散	频率步进	工作频率	跳频速度	调制能力	体积重量	成本
直接模拟式	很好	较难抑制	很难做小	全频段	快	有限	大	高
直接数字式	好	很难抑制	很小	低	快	方便	小	较低
间接模拟式	好	好	较难做小	全频段	慢	有限	较小	较高
间接数字式	较好	较好	较小	较低	慢	有限	小	低

1.1.2 合成频率源的主要技术指标

合成频率源的输出频率范围，输出功率及功率起伏，输出波形和调制状态，功耗、电源、环境条件等与自激振荡源的定义要求一样，下面仅对相噪、杂散、频率步进和跳频速度四项做一简介。

相噪——相噪就是短期频率稳定度，其物理量纲为 rad^2/Hz ，是输出频率两边富氏频率的函数，所以定义为偏离某频率 1Hz 带宽内噪声功率谱密度与输出信号功率之比，记为 $-\text{dBc}/\text{Hz}$ 。相噪是合成频率源最重要的技术指标，它直接影响现代电子系统的性能，例如影响雷达的改善因子，影响接收机的检测能力，影响通信质量等。相位噪声的大小与输出频率有关，按每倍频乘变坏 6dB，即按 $20\lg N$ 变坏， N 为倍频次数。

杂散——在频率合成过程中产生的不需要频率分量，又没有被充分地抑制掉，这些不需要的频率分量被称为杂散。一般用偏离输出频率多少频率上的频谱功率表示，记为 $-\text{dBc}$ 。它也是合成频率源的一项重要技术指标，杂散越小越好，一般要求 -60dBc ，优质的频率源杂散能达到优于 -80dBc 。

频率步进——合成频率源的输出频率不是连续的，是一个频率点一个频率点合成出来的，把相邻两个频率点叫最小频率步进，把起始频率到终止频率叫最大频率步进。目前用 DDS 技术产生的最小频率步进能达到微赫兹。

跳频速度——也就是频率捷变时间，从得到跳频指令开始到频率转换完成为止，这段时间叫跳频时间。这里存在什么叫频率转换完成，一般用相位差定义，把新建立起来的频率相位比基准频率相位差 0.1rad 时的时间称为频率捷变时间。

以上四项技术指标是合成频率源中最重要的技术指标，它们的好坏决定了合成频率源的好坏。

1.2 合成频率源基本原理

合成频率源的合成方法分直接模拟式、直接数字式、间接模拟式和间接数字式四种，合成方法不同基本原理也不同，简介如下。

1.2.1 直接模拟式基本原理

直接模拟式频率源其合成方法有很多种，归纳起来都是对基准频率进行各种各样的加减乘除。混频器视为对频率进行加减，倍频器视为对频率相乘，分频器则为对频率相除。通过对频率进行加减乘除产生出各种新频率，再用滤波器和电子开关分别选出所需的频率来，经放大器、滤波器输出。这种方法也是经典方法，相噪好坏主要决定晶振的好坏，目前 100MHz 晶振市场上能买到 $-169\text{dBc/Hz}@10\text{kHz}$ 的产品。这种方法电路复杂，杂散决定于滤波器的好坏和电磁兼容性设计的合理程度。跳频速度主要决定于电子开关的速度，目前开关速度一般在几十纳秒到几百纳秒，小于几十纳秒的电子开关价格昂贵，开关的通断比现在一般都很好，国内产品一般都能达到 100dB 左右。直接模拟式频率源如果步进太小，电路就更复杂，滤波器也很难设计，因此体积大、成本高是这种频率源的主要缺点。

1.2.2 直接数字式基本原理

直接数字式频率源是 20 世纪 80 年代以后发展起来的新型频率源，它使用数字技术完成频率和波形的合成，再经过滤波复原出模拟波形。具体讲就是把波形的幅度和相位信息，按规律存储在寄存器里，工作时按要求规律取出信息数据，经 D/A 变换后，再经过滤波就完成了直接数字式的合成。由于幅度和相位信息用数字量表示，就存在量化精度问题，即不可避免的数字量存在 ± 1 误差问题，造成某些情况下不可避免的幅度失真和相位失真，所以引起该频率源杂散大，采取相应措施，虽可以大大降低杂散，但必定不能彻底消除，只有输出频率和时钟频率是整数倍关系时才能保证杂散很小。

这种用直接数字技术做成的频率源，相噪好，跳频速度快，频率步进可很小，调制灵活，缺点是杂散大，目前输出频率不高，一般在 1GHz 以下。直接数字式频率源基本原理框图如图 1.1 所示。从图 1.1 中看出，在时钟的控制下相位累加器在频率码控制下进行相位线性累加，再根据累加的相位码在存储器中寻出幅度码，经过 D/A 变换得到相对应的幅度阶梯波形，再经低通滤波器变为连续波。

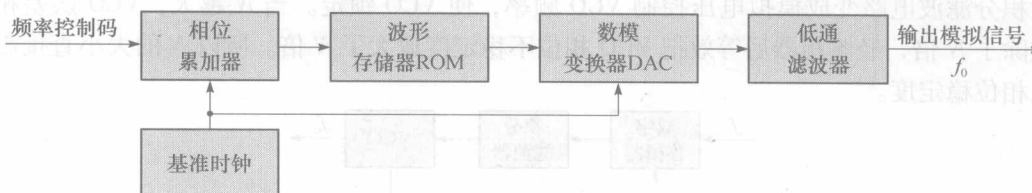


图 1.1 直接数字式频率源原理框图

1.2.3 间接模拟式基本原理

间接模拟式频率源主要是利用模拟锁相环锁定 VCO 来实现频率合成, 由于锁相环需要时间, 所以间接式频率源跳频速度比直接式慢, 一般在 $10\mu\text{s}$ 以上。锁相环可等效为窄带滤波器, 所以这种频率源杂散较好。基本原理框图如图 1.2 所示。间接模拟式主要使用正弦鉴相器, 所以相噪较好, 电路比数字式复杂, 体积较大, 成本较高。由图 1.2 看出, VCO 频率与晶振倍频上来的微波基准混频, 将 VCO 频率平移到中频频段, 以方便处理。混频后信号经放大器再与晶振产生的一系列频率标准进行同频鉴相, 锁住 VCO 相位, 使 VCO 输出频率相位跟踪晶振相位, 实现对 VCO 锁定。利用频率控制, 同步控制 VCO 频率和频标频率, 实现不同频率锁定和频率捷变。上述为一典型微波混频锁相环, 当 VCO 频率不高时也可以不使用倍频器和混频器, 把 VCO 直接送鉴相器。

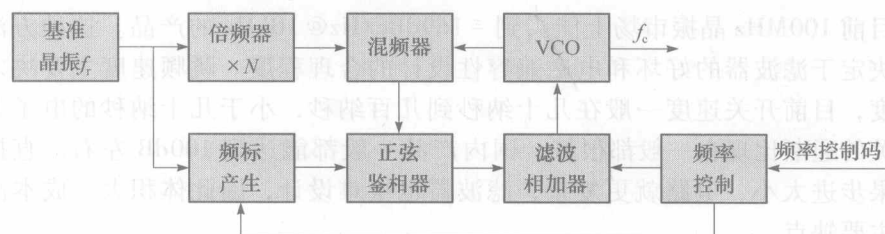


图 1.2 间接模拟式频率源原理框图

1.2.4 间接数字式基本原理

间接数字频率源是由数字锁相环构成的, 什么是数字锁相环, 就是在锁相环内插入数字分频器和数字鉴相器。分频器种类很多, 常用的有程控分频器、吞除脉冲分频器和小数分频器。

间接数字频率源体积小, 成本低, 频率步进小, 使用方便可靠, 可实现大规模集成等优点, 大量应用在通信技术中。主要缺点是输出相位噪声较差, 因为锁相环内使用了分频器, 输出相噪与环内分频器种类和分频次数有关, 分频次数 N 越大, 相噪越差, 一般按 $20\lg N$ 变坏。因此使用吞除脉冲分频器的锁相环相噪最好在 -100dBc/Hz , 使用小频分频器相对比吞除脉冲分频器好一些, 但输出杂散比前者大。

间接数字式频率源基本原理框图如图 1.3 所示, 从图 1.3 中看出, VCO 频率被除 N , 目的是把 VCO 频率除到鉴相器基准频率 f_r 左右, 送到数字鉴相器进行鉴频鉴相, 鉴相器输出通过积分滤波电路变成模拟电压控制 VCO 频率, 使 VCO 锁定。当 N 越大, VCO 误差相位也被除了 N 倍, 经鉴相器后等效把 VCO 相位不稳定性放大了 N 倍。所以 N 的大小直接影响输出相位稳定度。

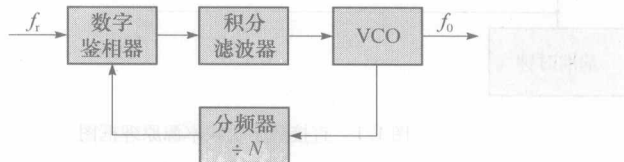


图 1.3 间接数字式频率源原理框图

1.3 频率源的发展和重要性

频率源技术近 30 年发展很快,尤其是近 10 年低相噪技术、低杂散技术和直接数字合成技术突飞猛进,相噪、杂散几年就降低一个数量级,直接数字合成技术更是如此。在国内该技术发展并不理想,由于技术难度大、耗资大,几十年并没有得到十分重视。所以西方人 20 世纪 40 年代就提出的频率合成技术,目前在国内还主要靠进口。大量的合成频率源、频谱分析仪、网络分析仪以每台几十万元到 100 万元人民币的价格大量进口,还有合成频率源中的关键元器件,如低相噪晶振、微波小体积滤波器、微波单片放大器等都大量进口,近 20 年发展起来的直接数字合成技术更是如此,百分百的靠进口。该合成技术尽管目前还有一些缺点,但它代表了频率合成技术的方向,解决了一些其他合成技术无法解决的技术难题,是频率源数字化的关键步骤。

频率源的好坏直接影响微波系统高频系统的性能,是这些系统中的核心,例如在雷达系统中,频率源给雷达系统提供发射激励信号,接收机本振信号,相参基准信号等。因此,可以说频率源是现代微波和高频电子系统的核心,它的性能直接影响电子系统的关键技术指标,频率源在现代电子系统中是非常重要的。

1.4 频率源关键技术和工程设计要点

频率源在电子系统中十分重要,它的关键技术就是低相噪设计和低杂散设计及实现这些设计的电磁兼容保证措施。

在具体工程设计中,不论是方案设计还是电磁兼容设计甚至印制版设计、结构设计等都必须围绕如何降低相噪和杂散来考虑。因为低相噪、低杂散设计是靠综合各个方面,全面考虑才能达到目的。

例如低相噪设计,只靠一个合理的方案和一个满足要求的低相噪晶振是不行的,还必须考虑合理的电磁兼容措施,正确的印制版设计及精心的调试技术才能全面保证达到低相噪。低杂散设计也是如此,不仅要有一个正确的方案,还必须要有正确的电磁兼容措施,合理的元器件选择,如高隔离的混频器、高带外抑制的滤波器、高通断比的电子开关及频道之间的高隔离设计等。

1.5 总 结

本章对频率源的各个方面做了简介。频率源在电子系统中占有重要地位,但是与国外相比我们落后很多,这就制约了很多重要领域的发展,如仪器、仪表业,通信业等,这些领域中的先进系统几乎全靠进口。这对我国的现代化,尤其是国防现代化都有很大影响。国内研制单位尽管很多,但都在低层次上重复研制,并没有真正掌握其关键技术。当然该技术难度确实较大,知识面又较宽,希望有关部门给予重视,为我国的国防事业做出更大贡献。

第2章 频率源合成方法

由一个或几个基准频率产生一个或更多频率的过程叫频率合成。完成这个过程电子装置叫频率合成器，又叫合成频率源，本章简介各种合成方法。

2.1 非相干合成法

非相干合成法是一种早期的合成方法，用电子开关切换多个石英谐振器，使晶体振荡器能够输出多个振荡频率，如图 2.1 所示，该方法等效多个晶振切换。例如晶振 I 频率为 190 ~ 199 MHz，步进 1 MHz 共产生 10 个频率点，晶振 II 频率为 20.1 ~ 21 MHz，步进 0.1 MHz 共产生 10 个频率点；混频输出取和频为 210.1 ~ 220 MHz，频率步进 0.1 MHz 共产生 100 个频率点输出。

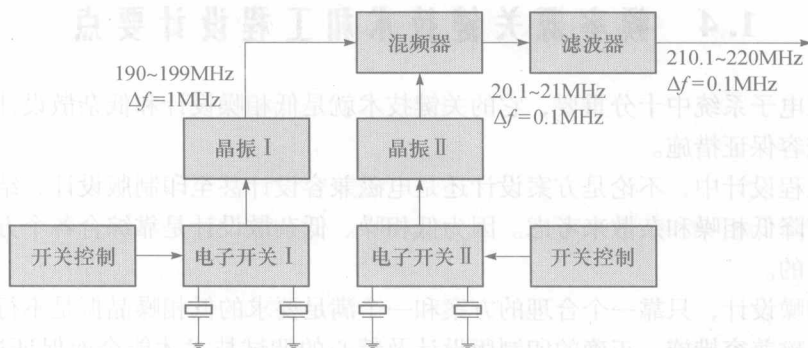


图 2.1 非相干合成原理框图

2.2 漂移对消法

漂移对消法（框图如图 2.2 所示），也是一种早期的合成方法。在直接合成中，常遇到混频比不满足要求，漂移对消法通过引入辅助振荡器，二次或者多次混频来解决混频比的问题。辅助振荡器的两次混频能把辅助振荡器的频率漂移和相噪对消掉，辅助振荡器的不稳定性对输出频率没有影响，当然辅助振荡器在复杂系统中，信号走的路径很难保持一直，便造成时间延迟略有差异，对消可能有一定的影响，所以这种方法使用于简单电路中。该方法简单易行，把多个频率点变换成某一个固定频率，经固定频率滤波器将各种杂散滤除。该方法等效一组开关滤波组件，但大大降低开关滤波组件的成本，同时能缩小体积、减轻重量。设计这种方案代替开关滤波应考虑组件，辅助振荡器的漂移。使辅助振荡器的温度频率漂移和调谐频率误差之和小于滤波器的 1dB 带宽。同时滤波器的带外抑制好坏直接影响输出杂散。

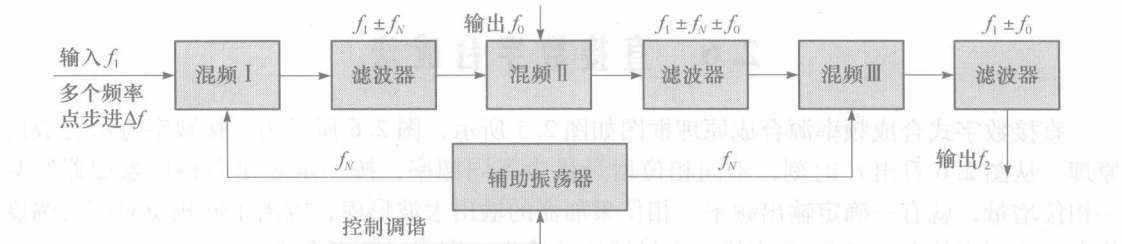


图 2.2 漂移对消法原理框图

2.3 倍频、分频、混频法

相干直接合成法是对频率进行加、减、乘、除，如图 2.3 所示，用一只基准晶振，对晶振频率进行倍频、分频、混频，产生所需频率。该方案的关键是合理选择倍频次数、分频次数，以获得正确的混频比。否则混频器输出滤波器无法良好地滤除杂散，使合成器输出杂散很差。该方案关键技术是滤波器的性能和正确的混频比。

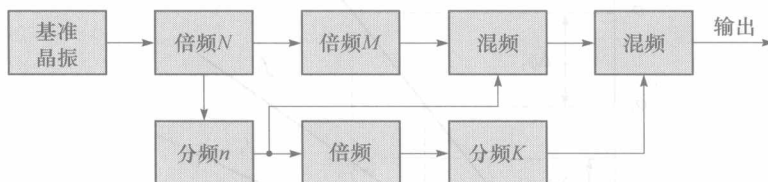


图 2.3 倍频、分频、混频法合成原理框图

2.4 谐波发生器加开关滤波组件法

当要求输出频率点不多，频率步进较大时，可直接采用谐波发生器，产生所需的谐波频率，再用开关滤波组件将其分别选出，故又称谐波选取法，如图 2.4 所示。如需更多频率点可与图 2.3 方法相结合即可。该方法产生的输出频率相噪最好，所以常用该方法产生频率合成器的微波频率标准。

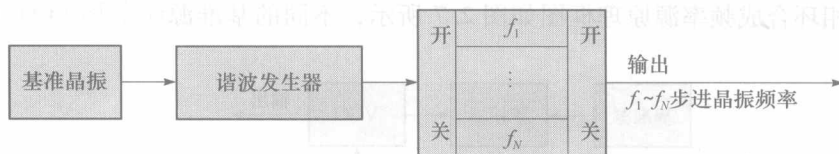


图 2.4 谐波选取法合成原理框图

2.5 直接模拟合成法

当要求跳频速度快、相噪好时可选用直接模拟合成法，即综合 2.3 节和 2.4 节方法，构成典型的直接模拟频率源。该方法合成的频率源性能指标最好，缺点是成本高、体积大。详细分析设计后面有专述。

2.6 直接数字合成法

直接数字式合成频率源合成原理框图如图 2.5 所示，图 2.6 所示为直接数字方法合成的原理。从图 2.6 看出 t_1 时刻，不同相位增量代表不同频率，按一定规律向相位累加器给某一相位增量，就有一确定输出频率。相位累加器的输出去波形库，查出不同相位对应的幅度信息，该幅度信息，经 DAC 变换，再经滤波后输出，完成了频率合成。

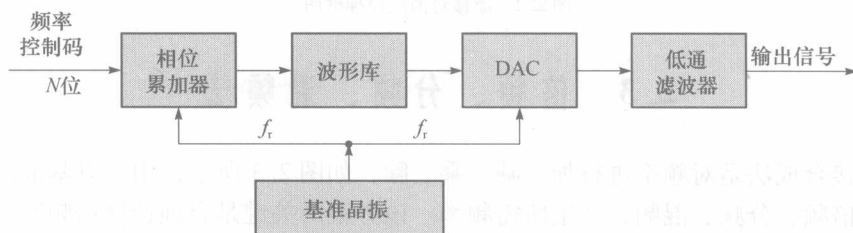


图 2.5 直接数字式合成频率源原理框图

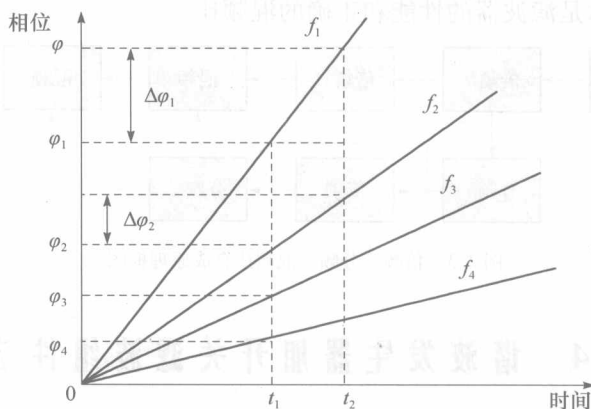


图 2.6 直接数字式频率合成原理图

2.7 模拟锁相环合成法

模拟锁相环合成频率源原理框图如图 2.7 所示，不同的基准源频率将 VCO 锁定在相应频率上。

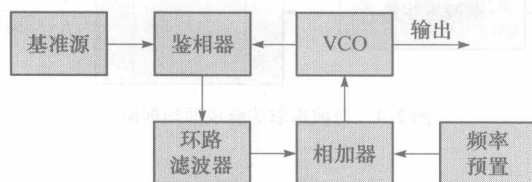


图 2.7 模拟锁相环合成频率源原理框图

2.8 混频锁相环合成法

常用的混频锁相环合成频率源原理框图如图 2.8 所示，这种方法常用于微波锁相环中，

假设频标产生 $f_1 \sim f_{10}$ 十个频率点做鉴相基准，微波频标从 $f_{11} \sim f_{15}$ ，频率间隔为 $f_1 \sim f_{10}$ 间隔，为十进位。微波频标与 VCO 混频，将 VCO 频率平移到鉴相基准频率上，再进行鉴相锁定 VCO，这样可以锁定 50 个频率点。

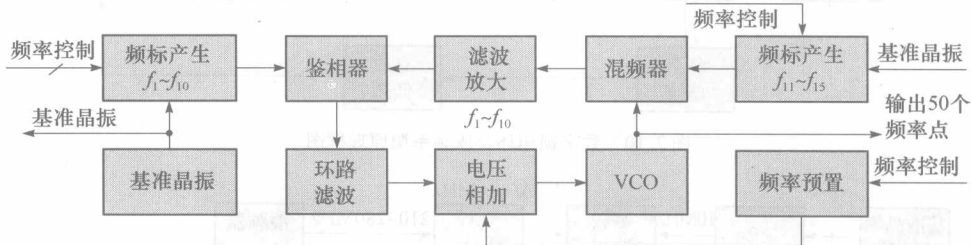


图 2.8 混频锁相环合成频率源原理框图

2.9 复杂锁相环合成法

图 2.9 所示为一种较为复杂的锁相环合成原理框图，VCO 输出与微波基准混频，将输出频率搬移到高频频段上，这样做可保持相噪最佳。微波频标与微波基准产生均可使用谐波发生器加开关滤波组件产生。这样既扩展了合成带宽，又使相噪恶化较少，相当于把 VCO 频率分段搬移到中频。分频器使合成方案得到简化，但影响相位噪声，如果对相噪要求很严的情况下，也可不用可变分频器，使频标产生多个频率点，即鉴相基准变，对中频信号同频鉴相，如图 2.8 所示。

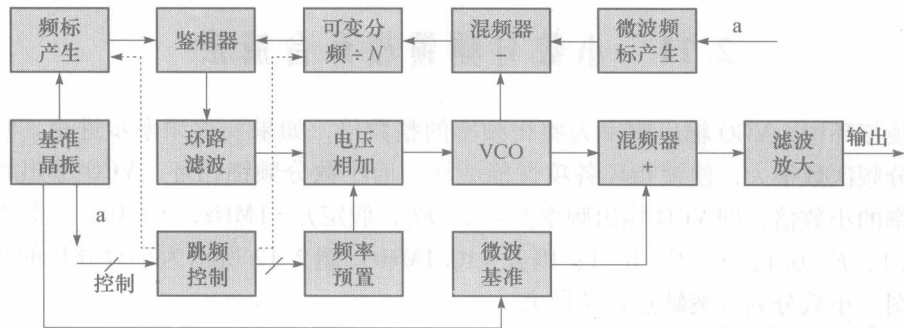


图 2.9 复杂锁相环合成频率源原理框图

2.10 数字锁相环合成法

图 2.10 所示为数字锁相环合成频率源原理框图，图 2.11 示出一个较复杂的数字锁相环合成频率源原理框图。从图 2.10 看出，数字锁相环与模拟锁相环不同之处在于模拟锁相环的鉴相器为正弦鉴相器，而数字锁相环的鉴相器为数字鉴相器，跳频是靠数字分频器改变分频次数实现频率跳变。

数字锁相环可以集成，所以体积小、重量轻。锁相环内引入高次分频器，鉴相器又具备鉴频、鉴相功能，所以锁相环捕获范围宽，稳定可靠，不需频率预置，数字锁相环缺点是分频次数大相噪不好，分频次数小环路稳定性变差。图 2.11 所示为一个步进 1kHz、相噪较好的双环数字锁相环频率合成器。

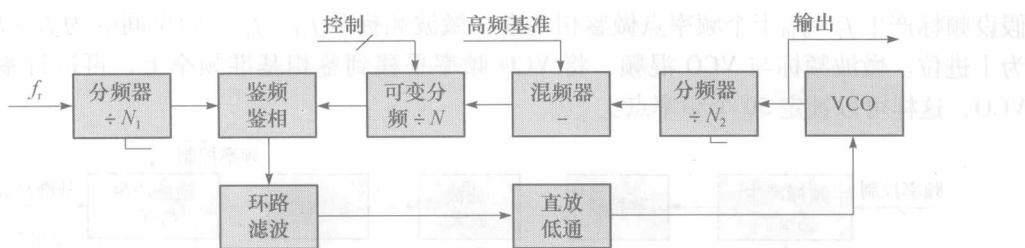


图 2.10 数字锁相环合成频率源原理框图

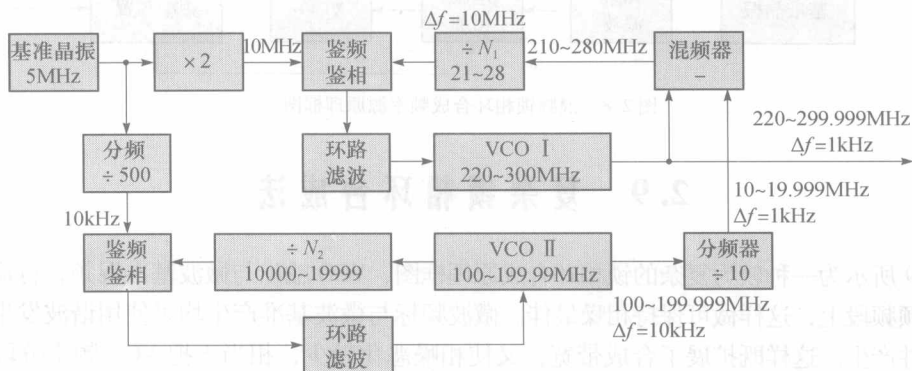


图 2.11 频率步进 1kHz 的双环数字锁相环频率合成器

2.11 小数分频锁相环合成法

数字锁相环中，VCO 输出频率为鉴相频率的整数倍，如果要求频率步进小，则鉴相频率很低，分频次数很大，使锁相环各项性能变坏。而小数分频锁相环，VCO 输出频率可以是鉴相频率的小数倍，即 VCO 输出频率 $f_0 = N \cdot Ff_r$ ，假定 $f_r = 1\text{MHz}$ ， $N = 10$ ，小数点后 F 为 1，即为 0.1， $F = 0.1$ ， $N \cdot F = 10.1$ ；则 $f_0 = 10.1\text{MHz}$ 。图 2.12 所示为小数分频的频率合成器原理框图。小数分频方案缺点是杂散大。

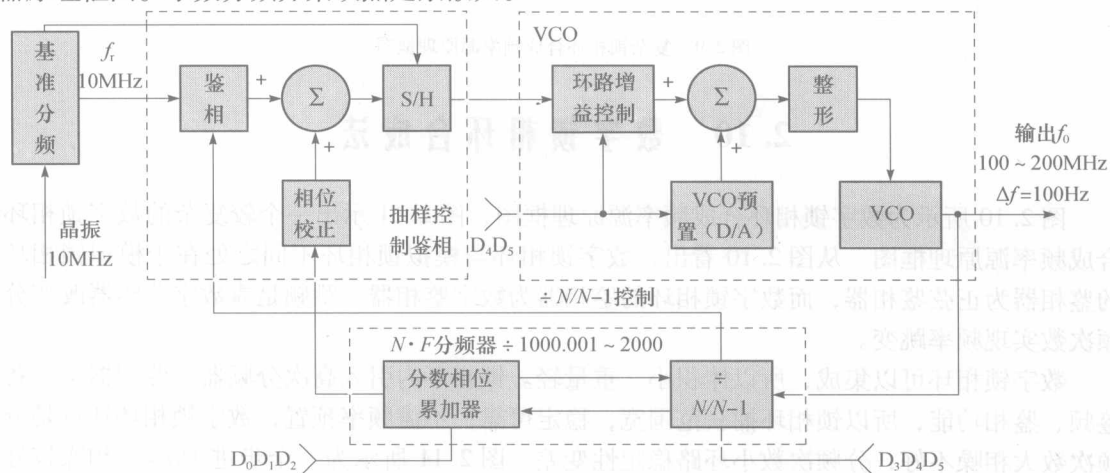


图 2.12 小数分频锁相环频率合成器原理框图

2.12 取样锁相环合成法

取样锁相环原理框图如图 2.13 所示, 100MHz 晶振经谐波产生器形成毫微窄脉冲, 该脉冲相位与晶振相位一样, 去取样鉴相器采样, 采样鉴相输出经采样保持电路形成误差电压, 对 VCO 锁定。该电路简单, 微波电路少, 缺点是采样鉴相效率低, 所以必须加直流放大器来提高环路增益, 以保持有一定的环路带宽, 直放增益高存在零漂问题, 所以该电路稳定性较差, 杂散也较大。

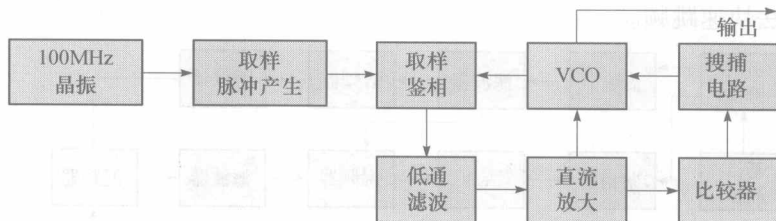


图 2.13 取样锁相环原理框图

2.13 谐波混频锁相环合成法

谐波混频锁相环原理框图如图 2.14 所示, 谐波混频方案克服了取样锁相环的缺点, 将环路增益转移到中放, 这样克服了零漂问题, 环路相对稳定。中放有中频滤波器, 把无用谐波大大抑制, 使输出杂散得到改善。缺点是频率步进不能太小, 步进太小容易出现错锁。

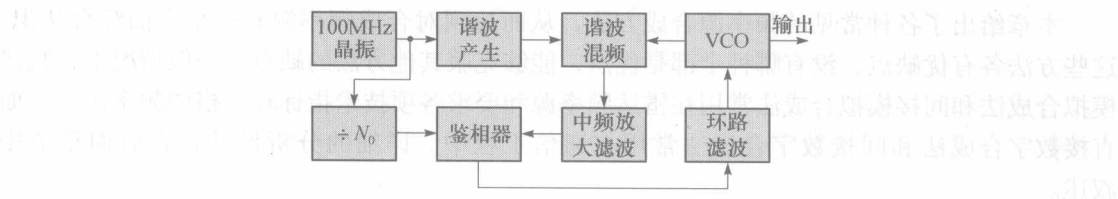


图 2.14 谐波混频锁相环原理框图

2.14 注入锁相环合成法

注入锁相环合成法原理框图如图 2.15 所示, 基准晶振倍频后, 注入 VCO, 对 VCO 进行同步, 最后锁定 VCO。锁定带宽与输入功率大小有关, 输入功率大, 锁定带宽宽。为了提高锁相稳定性, 要求 VCO 的稳定度尽量高。注入锁相环目前大量用于毫米波功率放大器。用一个稳定的高稳小功率信号, 注入锁定一个大功率的振荡器, 例如体效应振荡器、雪崩管振荡器等, 这样构成注入锁定放大器。注入功率与输出功率之比为注入放大器的增益。

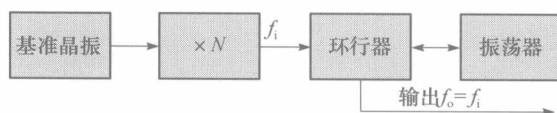


图 2.15 注入锁相环合成原理框图