

单边带通讯设备

(下 册)

(频率合成技术与锁相环原理部分)



西安交通大学

无线电技术教研室通讯教学组编

一九七七年九月

内 容 简 介

本书共分上、中、下三册

上册是基本原理和单元电路，共分三章，依次为单边带通信概论，单边带通信中的频率变换，单边带通信中常用的滤波器。

中册是收发讯机部分，共分五章，依次为单边带发射机，宽频带线性高频功率放大器，干扰和噪声，单边带接收机主要指标，单边带接收机。

下册是频率合成器，共分七章，依次为频合基本原理，频合的相位噪声及主要指标，频合器的型式，锁相环原理，锁相环主要部件（压控振荡器与鉴相器），可变分频器，数字式频合器的寄生输出。

440074

登录号:

技术与锁相环原理(部分)

教研室 1977

名 借书证号 参 名
应还日期

DA 64/5

毛主席语录

教育必须为无产阶级政治服务，必须同生产劳动相结合。劳动人民要知识化，知识分子要劳动化。

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时间内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进的水平。

这个辩证法的宇宙观、主要地就是教导人们善于去观察和分析各种事物的矛盾的运动、并根据这种分析，指出解决矛盾的方法。

读书是学习，使用也是学习，而且是更重要的学习。从战争中学习战争——这是我们的主要方法。

目 录

第一章 频率合成的基本原理

§ 1-1 频率合成的基本概念	1
§ 1-2 频率合成的基本原理与分类	3
§ 1-3 频率合成的基本方法	4
(1) 直接式合成法(混频滤波法)	
(2) 间接式合成法(锁相环路合成法)	
(3) 数字式合成法(数字锁相环路合成法)	
(4) 频率漂移抵消法(混频滤波法中的一种)	
(5) 脉冲锁相合成法(锁相环路合成法中的一种)	
§ 1-4 频率合成的应用	8
本章复习思考题	9

第二章 频率合成器的相位噪声及主要技术指标

§ 2-1 功率频谱密度函数	10
(1) 单频信号	
(2) 随机信号	
§ 2-1 相位噪声及其功率频谱密度函数	13
§ 2-3 相对噪声功率频谱密度	15
§ 2-4 实际正弦信号的相位噪声的频谱分布	17
§ 2-5 相位噪声的加、减、乘、除问题	18
(1) 相位噪声通过混频器	
(2) 相位噪声通过倍频器	
(3) 相位噪声通过分频器	
§ 2-6 长期频率稳定度	20
§ 2-7 带外的相位噪声	21
§ 2-8 带内的相位噪声	24
§ 2-9 信号的相位抖动	26
§ 2-10 频率的间隔(也称讯道间隔)	27
本章复习思考题	28

第三章 频率合成器的型式

§ 3-1 频率标准与谐波发生器	29
(1) 频率标准	
(2) 谐波发生器	

§ 3-2 连续变频的直接合成法的型式	34
§ 3-3 恢复法合成频率的合成器型式	38
§ 3-4 频率漂移抵消法合成器型式	41
(1) 基本原理	
(2) 频漂抵消法合成器方案设计的有关问题	
(3) 缩小频率间隔, 增加不连续频率的数量的方法	
(4) 如何介决波段展宽问题	
(5) 频漂抵消法合成器实例介绍	
§ 3-5 I. G. O 环路的频率合成器的型式	52
§ 3-6 数字式环路的频率合成器的型式	54
(1) 单环路数字式合成器	
(2) 三环路数字式合成器	
(3) 双环路数字式合成器	
§ 3-7 混频环路(或称加减环路)的频率合成器的型式	59
§ 3-8 数字式频率合成器实例介绍	60
§ 3-9 混合式频率合成器的型式	62
(1) ST1400 海运单边带电台频率合成器介绍	
(2) S1250 船用单边带发射机频率合成器介绍	
本章复习思考题	65
本章附录——短波单边带电台频率合成器方案实例	66

第四章 锁相环原理

§ 4-1 锁相环的基本概念	77
(1) 什么叫锁相环?	
(2) 锁相环研究的主要问题	
§ 4-2 锁相环的组成与基本部件	80
(1) 锁相环的组成	
(2) 环路引入低通滤波器的目的	
(3) 压控振荡器的特性	
(4) 鉴相器的特性	
(5) 环路低通滤波器的传输函数	
§ 4-3 环路基本方程与相位模型	86
(1) 环路基本方程的推导	
(2) 环路锁定的概念	
§ 4-4 一阶锁相环路的动态特性	89
(1) 一阶环的运动方程及其介	
(2) 一阶环的相平面	
(3) 具有非单值鉴相特性的一阶环相平面	
§ 4-5 差拍状态下的频率牵引现象	100

§ 4-6 线性化系统	104
(1) 线性化概念	
(2) 线性化环路方程与相位模型	
§ 4-7 一阶环路的传输函数和频率响应特性	106
§ 4-8 环路低通滤波器	107
(1) RC 积分滤波器	
(2) 比例积分滤波器	
(3) 有源比例积分滤波器	
§ 4-9 环路的同步带与捕捉带	113
§ 4-10 二阶环路的环路传输函数	115
(1) 环路传输函数的一般表示式	
(2) 实际的环路传输函数	
(3) 环路的频率响应	
§ 4-11 线性跟踪与过渡过程	122
(1) 输入相位阶跃 $\Delta\theta$	
(2) 输入频率阶跃 $\Delta\omega$ (相位斜升)	
(3) 输入频率斜升	
(4) 输入正弦调频信号	
(5) 输入正弦调相信号	
(6) 过渡过程	
§ 4-12 数字式二阶锁相环路和混频环的分析	129
(1) 数字式二阶锁相环	
(2) 混频环	
§ 4-13 二阶环路的同步带, 快捕带和捕捉带	132
§ 4-14 扩大捕捉范围的方法	136
(1) 扫描法	
(2) 变带宽法	
(3) 鉴频法	
§ 4-15 锁相环路的稳定性问题	143
本章复习思考题	146

第五章 锁相环路合成器的主要部件——压控振荡器与鉴相器

§ 5-1 压控振荡器的工作原理	148
(1) 对 VCO 质量指标的要求	
(2) 压控振荡器的调谐特性	
(3) 压控振荡器的工作原理	
(4) VCO 的灵敏度 K_{VCO} 及对 VCO 的粗调	
§ 5-2 VCO 的相位噪声	154
(1) VCO 的相位噪声	

(2) 降低 VCO 开环相位噪声的措施	
§ 5-3 几种 VCO 电路的 K_{VCO} 的平稳度	159
(1) 全电容调谐	
(2) 部分电容调谐	
§ 5-4 VCO 电路的设计考虑	162
§ 5-5 VCO 实际电路举例	165
§ 5-6 取样保持式鉴相器和取样锁相环	168
(1) 取样保持式鉴相器的工作原理	
(2) 锯齿波取样保持式鉴相器原理	
(3) 三角波取样保持式鉴相器原理	
(4) 对正弦波取样的鉴相器	
(5) 取样保持式鉴相器的数学模型	
(6) 取样锁相环路的讨论	
(7) 取样保持式鉴相器的实际电路介绍	
(8) 减少鉴相器输出纹波的方法	
§ 5-7 倍频式鉴相器和 $I. G. O$ 环路	178
§ 5-8 电流型鉴相器	181
(1) 概述	
(2) 电流型鉴相器的电路原理	
(3) 具有电流型鉴相器的环路在锁定状态下的性能分析; (近似)	
(4) 电流型鉴相器锁相环路的特点	
本章复习思考题	

第六章 数字式锁相环路合成器的主要部件——可变分频器

§ 6-1 可变分频器的作用和主要技术指标	188
§ 6-2 可变分频器的单元部件	190
§ 6-3 十进计数器	194
(1) 8421码十进计数器	
(2) 环形计数器	
§ 6-4 可变分频器的工作原理	200
(1) 十读出法可变分频器	
(2) 九读出法可变分频器	
§ 6-5 提高可变分频器速度的措施	205
(1) 可变分频器最高工作频率	
(2) 提高可变分频器速度的方法	
(3) 提高可变分频器速度中存在的问题	
§ 6-6 吞脉冲可变分频器——脉冲吞除技术的基本原理	209
§ 6-7 吞脉冲锁相环路	212
本章复习思考题	216

第七章 数字式合成器的寄生输出

§ 7-1 数字式单环电路中由纹波引起的杂散.....	217
(1) 由纹波所引起的杂散大小的表示式	
(2) 附加滤波器	
(3) 附加滤波器后环路的稳定性	
§ 7-2 数字式单环电路中的随机相位噪声.....	221
(1) 由参考信号的噪声 $\theta_n(t)$ 引起的输出相位噪声	
(2) 由 VCO 的固有噪声引起的输出相位噪声	
(3) 可变分频器、鉴相器、运算放大器等的相位噪声	
(4) 环路输出相位噪声表示式	
§ 7-3 数字式单环中输出相位噪声的讨论.....	226
(1) $\phi_0(\omega)$ 中的参考信号源噪声成分	
(2) $\phi_0(\omega)$ 中的触发噪声成分	
(3) $\phi_0(\omega)$ 中的白噪声成分与 $1/f$ 噪声成分	
(4) $\phi_0(\omega)$ 中的 VCO 相位噪声成分	
(5) 最佳环路自然角频率 ($\omega_{n\#}$) 的概念	
(6) 实例	
(7) 振动条件下 ω_n 的选择	
(8) 确实 $\omega_{n\#}$ 的实际办法	
§ 7-4 其他的寄生输出.....	233
§ 7-5 多环路数字式合成器的相位噪声的比较.....	234
(1) 各种数字式单环的比较	
(2) 双环路数字式合成器	
本章复习思考题.....	234

第一章 频率合成的基本原理

§ 1-1 频率合成的基本概念

什么叫频率合成与频率合成器？

频率合成就是利用一个标准的频率源作为参考来合成出我们所需要的许许多多的输出频率，这些频率与标准的参考频率具有同等的频率稳定度与准确度。而频率合成器则是能产生出这许许多多频率的一种装置或仪器。频率合成器（以下简称为合成器或频合器）是现代无线电收发机的一个主要部件，它作为收发机的本地振荡器，在发机中当作激励器，在接收机中作为变频级的本地振荡频率源，所以它是收发机的标准频率源的供应系统。图 1-1 (a), (b) 所示的就是具有频合器的高中频短波段收发机的简化原理方框图。此外，频合器也是近代无线电测量仪器中的一种高精度的标准信号发生器。

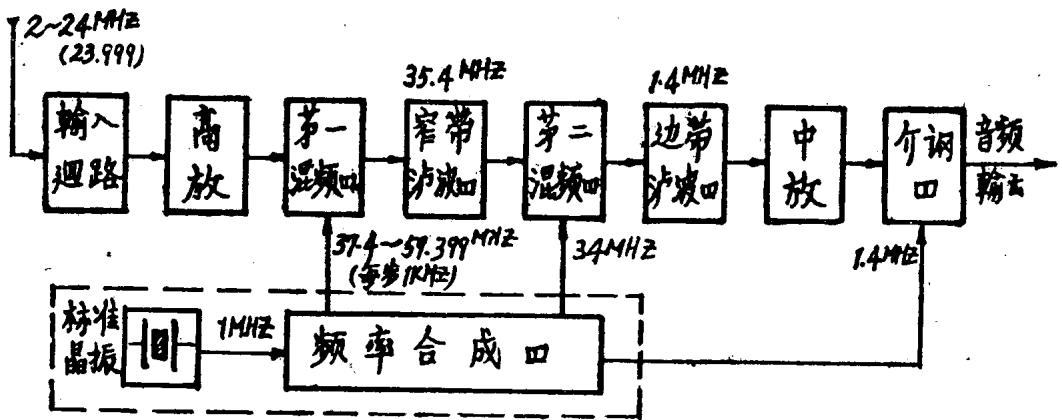


图 1-1 (a) 有频合器的高中频短波接收机原理方框图

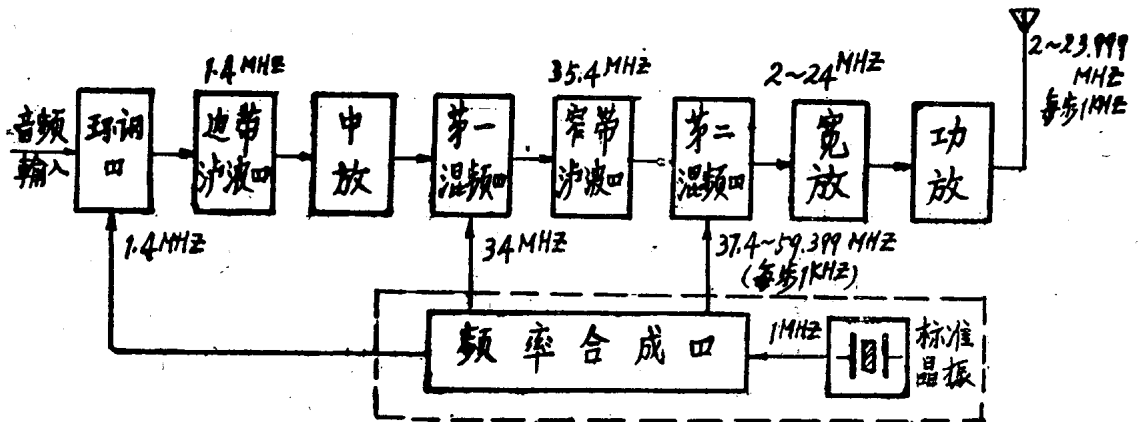


图 1-1 (b) 有频合器的高中频短波发射机原理方框图

由图 1-1(a), (b)所示的方框图中可见, 它的调制方式是单边带调制, 1.4 兆赫的边带滤波器是作为提取上边带或下边带信号用的。它是单边带电台的一种典型的程式。

为什么在现代通信中要采用频合器作为收发讯机的频率源供应系统呢? 大家知道, 在还没有广泛采用频合器以前, 发讯机往往采用多块晶体来改变发射频率, 接收机除了用多块晶体的办法外, 更多的是采取普通的可变振荡器的办法。多块晶体只能在有限几个频率(也称讯道)上通信, 这给现代通信带来了很大的局限性。用可变的 LC 振荡器的办法, 它的频率稳定性和准确度方面都很差, 因此, 在发讯机中不宜采用, 在接收机中使用, 最好需要另加自动频率调整系统, 并有人工的微调和搜索。即使这样, 也有可能误收频率靠近的相邻电台。这种情况, 在单边带通讯中问题更为突出, 这是因为单边带制通信要求收发讯机的载波频率的总偏差值应小于 $10\sim 20$ 赫。这样就对频合器的采用和对频合器的频率稳定性及准确度提出很高的要求, 这是一方面。另一方面, 随着现代通信技术的发展, 通信路数的激增, 要求在给定的波段范围内能容纳愈来愈多的电台, 以及为了提高远距离通讯道的精确分辨力等, 从而使得通信的讯道的间隔变得越来越窄。于是也对频合器的频率稳定性和准确度要求越来越高。若采用多块石英晶体振荡器作为标准频率, 这对于诸如广播和定向通信那些仅需要在几个固定频率当中选取一个频率工作的设备, 那自然是十分理想的。但是在现代通信设备中应用, 则出现了较大的困难, 因为它们需要从几百个或成千上万个相邻很窄的讯道中选择和使用一个讯道。如果以每一个讯道用一个石英晶体振荡器来介决这个问题, 显然是个笨拙的办法。频率合成技术就是为了适应现代通信技术发展的需要, 而不断地迅速地发展起来的。

当我们采用了频合器在收发讯机中后, 上述所有这些问题都可以介决, 而且介决得很好。当我们已知通信的确切工作频率后, 立即就可以打开接收机, 把频率选择旋钮放置在已知的讯号频率上, 就可以接收而无须人工的微调或搜索。在具有频合器的收发讯机上, 频率是采用数字形式直接显示出来的, 在使用中也十分方便。

频率合成器的主要特征在于它只用一块高精度的石英晶体来作振荡器, 并利用各种合成的办法就可以产生出许许多多的输出频率, 而这些频率具有与石英晶体振荡器同样的频率稳定性和准确度, 如图 1-1 中, 石英晶体振荡器的参考频率为 1 兆赫, 当输出工作频率为 15.678 兆赫时, 这个频率为晶振标频的 $15678/1000$ 倍, 这不是一个名义上的数值, 而是一个精确的严格的数值。因此, 频合器的任何一个输出频率的稳定度和准确度均与作为参考标频源的石英晶体振荡器完全一样, 这一点是很重要的概念。

在图 1-1 中, 频合器输出频率是每步 1 千赫, 它可以提供有 22000 频率点, 即讯道数。若每步减少为 100 赫, 则讯道数增加到 22×10^4 个。所谓讯道数只是指频合器输出固定频率的数目, 并不是在通常概念下的 3 千赫一个讯道数目。因此, 每步 1 千赫就称为讯道间隔为 1 千赫。即频合器两个相邻输出频率之间的频率间隔为 1 千赫。一般的短波通信用的频合器中, 讯道间隔为 $100\sim 1000$ 赫, 在超短波通信用的频合器中, 讯道间隔约为 $10\sim 50$ 千赫。显而易见, 频合器的讯道间隔越小, 讯道数目就越多, 可以容纳的通信电台数目也就越多。

综上所述, 频合器就是一个能够产生出各种大量频率的标准信号发生器。它是依靠一块放置在恒温槽内的高精度的石英晶体振荡器, 并以它的输出频率作为参考的基准, 采用各种频率变换合成的方法而产生出我们所需要的许多固定频率与可变频率。这些由参考基准频率所派生出来的各种频率具有与它同等的频率稳定性和准确度。这就是频率合成器的基本概念

与意义。以图 1-1 所示的频合器为例，它有一个 1 兆赫的参考基准频率，具有极高频率稳定度，一般可达到 10^{-6} 以上。经过种种频率合成的变换方法，导出的 1.4 兆赫和 31 兆赫的两个固定标准频率，以及产生出频率范围从 37.400~59.399 兆赫，每步频率变化为 1 千赫的可变标准频率。这些频率都与 1 兆赫石英晶体振荡器的参考标准频率具有一样的频率稳定度与准确度。

§ 1-2 频率合成的基本原理与分类

按频率合成的基本原理可分为两种类型的合成法，一类是直接合成法，另一类是间接合成法。如图 1-2 所示的经典直接合成和图 1-3 所示的稳定受控振荡器的间接合成。前者是直接从参考晶振产生的各种标频中，经混频器和滤波器进行各种组合选择后导出的。后者是根据锁相环路的原理，利用参考晶振产生的各种标频来对频率可变的另一个受控振荡器的频率进行相位控制锁定后输出的。

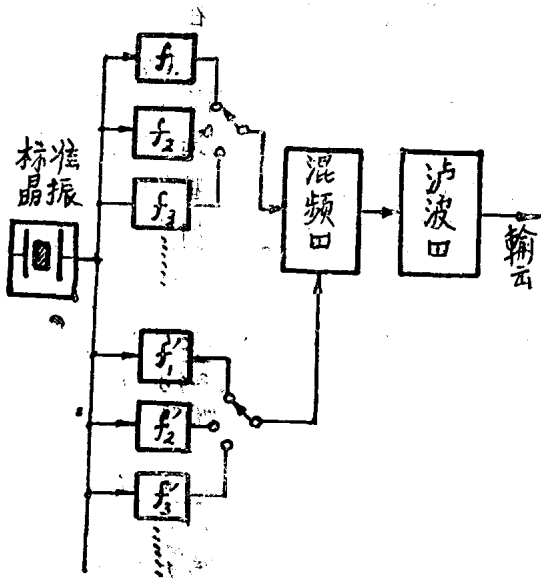


图 1-2 经典直接合成法原理简化方框图

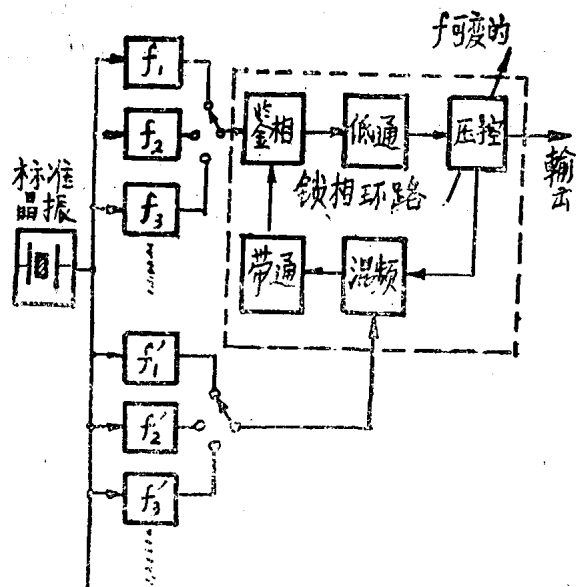


图 1-3 稳定主振荡器的间接合成法原理简化方框图

图 1-2 与图 1-3 中的标频 f_1, f_2, f_3, \dots 及 f'_1, f'_2, f'_3, \dots 是由参考晶振经分频、倍频等环节后产生的。不管应用那一种方法，其最后输出的大量频率的稳定度与准确度均与参考晶振的频率稳定度与准确度是相同的。此外，它们的组成也有很多相似之处，如两种方法中均有标准的石英晶体振荡器、分频器、倍频器、混频器等。但是，两种产生方法的基本原理却有本质上的不同。图 1-2 是直接从各种标准频率中进行组合混频后再经过各种滤波器的选择而直接取出的，所以称为直接合成法，也称为混频滤波法。图 1-3 是利用各种标频对受控的可变振荡器的频率进行相位控制锁定后，而产生输出的频率，其输出频率是从受控制的振荡器取出的，所以称为间接合成法，它的原理是根据锁相环路的原理，故又称为锁相法合成。受控振荡器的频率是受外加电压控制的，因此以后均称为电压控制振荡器（简称为压控振荡器），以国际上习惯用的 $\phi \cdot c \cdot o$ 来表示。

§ 1-3 频率合成的基本方法

上一节我们简单地介绍了频率合成的基本原理与分类，现在让我们从具体的例子出发来简单介绍一下频率合成原理是如何来实现的？以及用什么具体的方法来产生出大量的输出标频的？由于方法很多，只能介绍几个典型例子。

(1) 直接合成法：（又称相加技术合成法）

图 1-4 是一个纯合成直接法例子。一个 5MHz 的标准参考晶振的频率被一个除 5 的分频电路所减小，得出一个 1MHz 的信号频率。两个进一步除 10 的分频电路给出了 100kHz 与 10kHz 两个信号频率。把这三个频率分别送给三个谐波发生器的倍频电路中去，产生了按十进位变化的许多谐波频率。然后再送给能提取直至十次谐波为止的三个选频电路中去。这样就得到了为后面合成过程所需要的三十种其精度和稳定度均与 5MHz 标频相同的信号频率，供混频器和选频器进行组合选择。两个后继的混频器和选频器可在频谱为 $10\text{kHz} \sim 10\text{MHz}$ 内，使得 1 千个具有 10kHz 间隔的频率得到合成。不难理介，最后输出的这 1 千个频率都与 5MHz 标频的稳定度相同。但是，这个合成法的关键在于高质量的选频器（即滤波器）和混频器的设计与制作。由于其输出直接取自混频器后面的选频器，所以它的输出是不够纯净的。特别是在混频器中产生低电平的组合寄生频率是不可避免的。这个纯合成频率的直接产生法，实际上就是上面所说的混频滤波法，有人也叫做相加技术合成法。

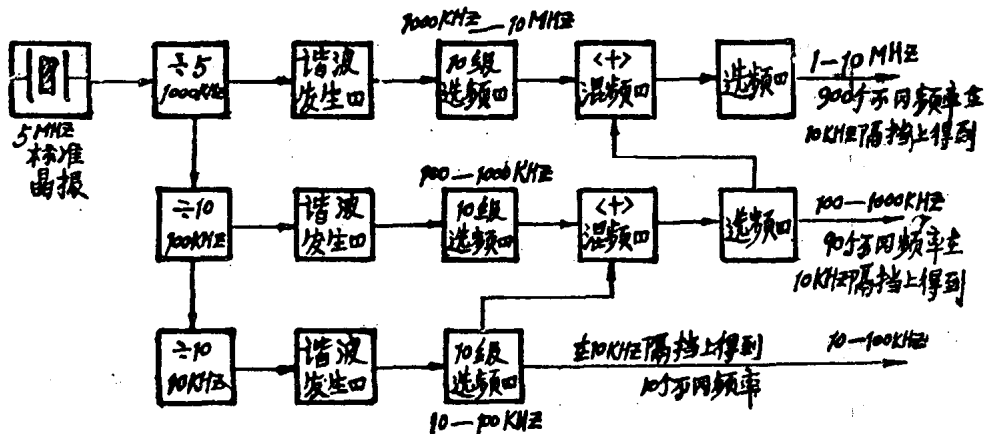


图 1-4 合成频率产生法（相加技术）方框图

(2) 间接合成法：（又称相减技术合成法）

与纯合成直接法（相加技术）对偶的一种方法，就是图 1-5 所示的是一种通过部分合成过程再加上相位锁定环路的间接法即锁相法，有人也称为相减技术合成法。由图 1-5 中可以看出许多单元都是与相加技术合成法中相似的。 5MHz 标准频率同样被分频成 1MHz 、 100kHz 、 10kHz 三个输出信号。同样也有三个谐波发生器的倍频电路，以及三个十进位级的选频电路。但是，相加电路被相减电路所替代。每个十进位级选频器担负着将每个确定

的信号频率送给相减电路，先从动压控振荡器的频率减去十进位级频率的最高谐波级开始，然后逐级进行下去。最后的差频在一个相位检测器和控制器（即比相器）中与最低的十进位级谐波进行相位比较，比较结果的输出控制信号被送去控制从动的压控振荡器的频率锁定。从动的压控振荡器输出频率的任何变化均可由相位控制回路给予及时的纠正，从而使其输出频率始终保持与标频的锁定，达到了与 5MHz 标频具有等同的频稳度与准确度。所以，相减技术合成法的本质仍然在于是应用了相位控制锁定的原理，其最后输出取自从动的压控振荡器，对参考标频来说是间接的所以称间接法。从合成原理上讲，又称为锁相法频率合成。

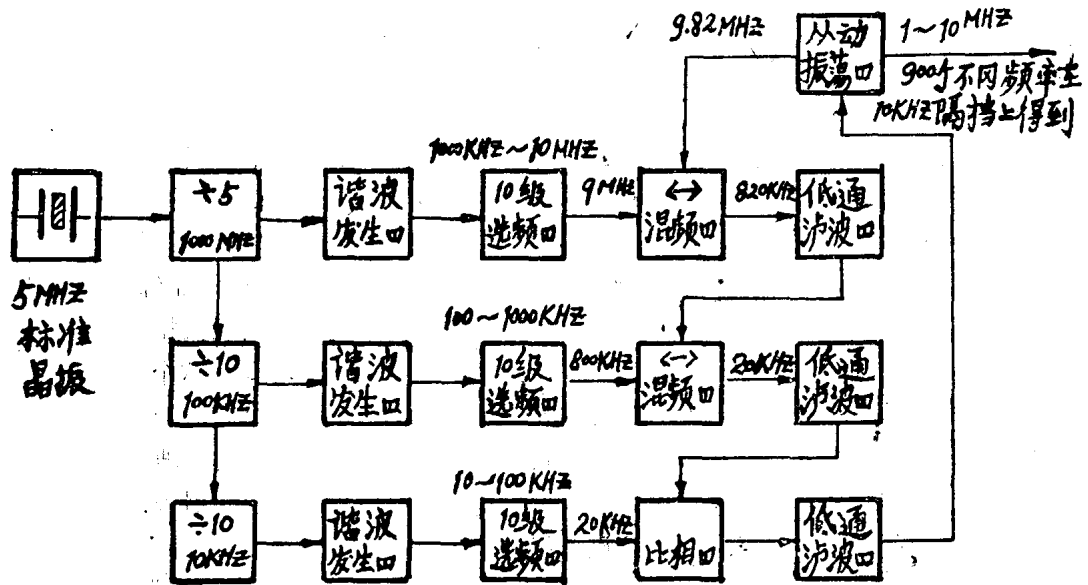


图 1-5 分析频率产生法（相减技术）方框图

由于利用了锁相环路原理，用锁定从动的压控振荡器的办法，使之有可能得到一个比较纯净的输出。这是因为我们利用了从动的压控振荡器将各分频器、谐波倍频器、混频器与最后输出的频率隔离开了，而不是直接从混频滤波后输出，这样就可以避免混频后的许多寄生组合频率产物直接从滤波器跑到最后输出频率中去。但更主要的是，锁相环路本身在此起到了窄带滤波器的作用。这是间接锁相法频率合成的优点，但它由于是利用相位比较器与控制器的直流输出电压去控制从动振荡器（压控振荡器）的频率，因此，若在此直流控制线路上混进一些交流波动、杂散干扰、噪声等成分后，就极易引起输出频率被调制，产生相位抖动与各种寄生调频，结果也增大了寄生输出等。这是不允许的，当然我们减少与消除这些相位噪声与频率跳动等寄生输出是有种种办法的，待后面章节再详细分析研究。

对比上述两种合成方法，我们可以发现，相加技术合成法中对滤波器的要求相当严格，且不易实现。由图 1-6(a)中，可见混频器后的滤波器应让 73KHz 通过，而对 67KHz 阻止，由于这两个频率相距很近，因此，对滤波器设计制作的质量要求很高。而在相减技术合成法中，由图 1-6(b)可见，混频器后面的滤波器是很容易实现的，和频是 143KHz 与差频是 3KHz 相离极远，而让 3KHz 通过，对 143KHz 阻止，这样的滤波器的设计与制作是不难的。

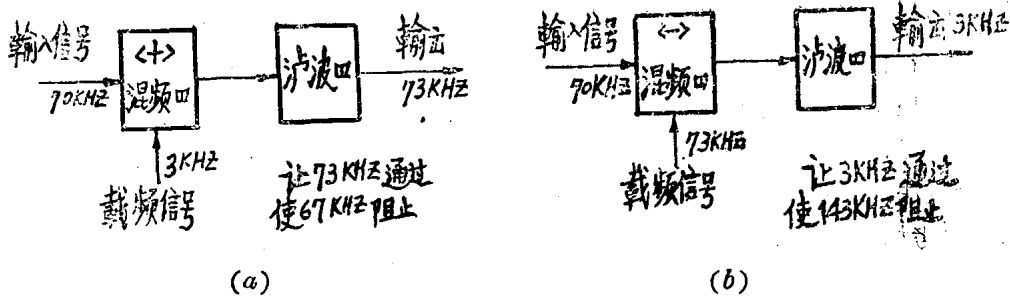


图 1-6 相加与相减技术合成法对滤波器的要求的比较

(3) 数字式合成法：（又称为相除技术合成法）

图 1-7 示出另一种叫做数字式锁相环的频率合成法的简化方框图。由图中可见，一个 5MHz 的标准晶体振荡器的频率被一连串分频电路固定除以 5000，得到一个 1KHz 的参考标频。从动压控振荡器频率范围为 $1\sim 10\text{MHz}$ ，它的输出经过一个数字式的可变分频器分频，分频比 N 为 $1000\sim 10000$ 中的任意一个整数。压控振荡器分两路输出，一路被数字可变分频器除 N 后得到 1KHz 左右的脉冲与 1KHz 参考标频一起加入相位比较器（简称鉴相器）中进行相位比较，鉴相器的输出控制信号经过低通滤波器后，被送去控制压控振荡器的频率。用一个伺服系统或人工控制压控振荡器的频率，它可在 $1\text{MHz}\sim 10\text{MHz}$ 这个范围内，在任何一个 1KHz 挡上被锁定，即在 9001 种的组合中的任一个被锁定。这个方法仍属于锁相式间接合成法，是锁相式的一种特殊形式。因为，它仍是应用相位控制锁定的原理来实现的，所不同的只是压控振荡器的输出先经过数字式可变分频器除后再送给鉴相器去比相。压控振荡器的另一路输出就作为信号频率供收发讯机使用。这就是数字式频率合成器的简单原理。这个方法所用电路一般较图 1-4 相加技术合成法与图 1-5 相减技术合成法为简单精巧，它取决于数字分频技术的水平。这个方法有人也叫它为相除技术合成法。

至此，我们介绍了三种频率合成的最基本的原理方法，下面再介绍二种也是常用的最基本的方法，一个叫频率漂移抵消直接频率合成法，另一个叫脉冲锁相间接频率合成法。

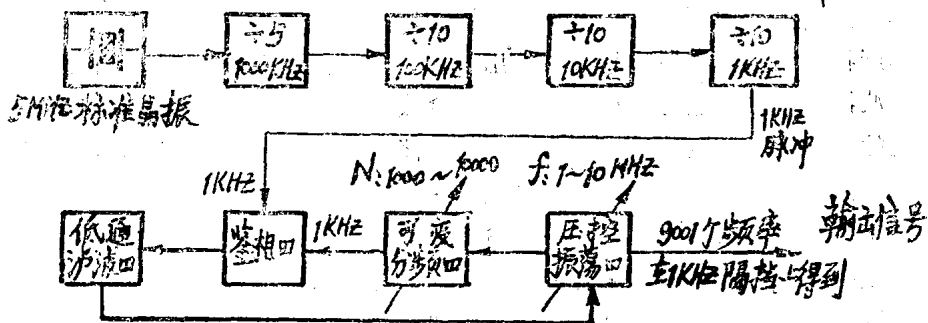


图 1-7 数字式频率合成法（相除技术）方框图

(4) 频率漂移抵消法：

在图 1-4 与图 1-5 中，我们可以看出相加技术合成法和相减技术合成法中，都是采用一个谐波发生器和一个十进位的选频器来当作一个十进倍频器来使用，这样在整个方案中使

用了大量的高质量的滤波器。这对我们实际制作大量的高质量滤波器带来很大的困难。即使制作出来了，其整个系统结构也必然是很复杂的，体积也一定很庞大。而且随着要求频道数目的增多（即频率间隔减少），则被使用的高质量滤波器的数量也就必然增多。那么，整个系统的体积和结构更加庞杂了。为了克服这些问题，人们想出了用双重变频法来解决，这个方法称频率漂移抵消法，是直接合成法中的一种形式。如图 1-8 所示。

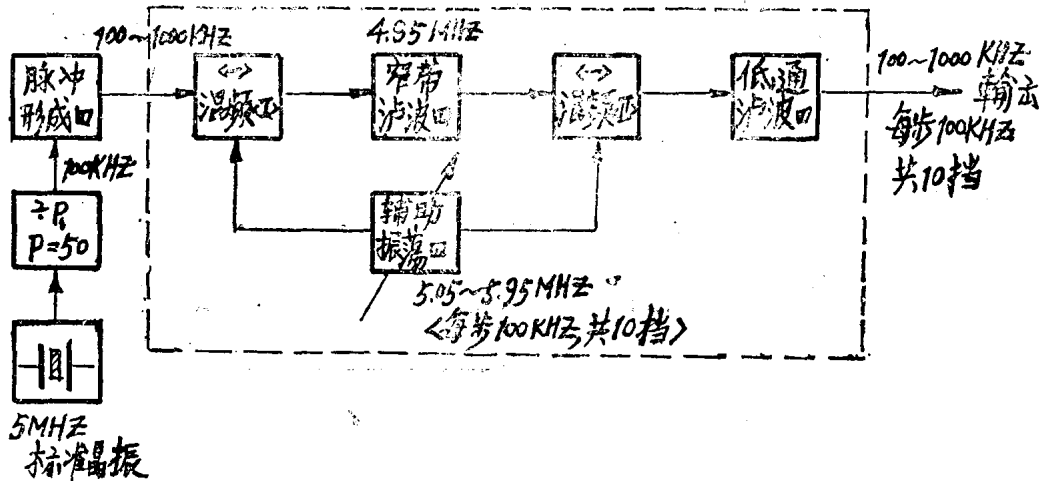


图 1-8 频率漂移抵消法可变倍频技术原理方框图

由图 1-8 中可见，5MHz 的晶体振荡器输出频率经一个固定的分频器 ($P=50$) 分频后，得到 100KHz 的信号频率，将此信号经过脉冲形成电路产生出 100~1000KHz 的 10 个频谱。然后，将它送进混频器 (I)，与由 LC 辅助振荡器输出的频率为 5.05~5.95MHz，频率间隔为 100KHz 的 10 个频率相混频。混频器 (I) 的输出通过一个 4.95MHz 的固定窄带滤波器，选出 4.95MHz 差频信号。然后，再将 4.95MHz 信号送给混频器 (II)，在混频器 (II) 中与辅助振荡器的 5.05~5.95MHz 信号再进行一次混频，也取其差频，最后经由 1MHz 低通滤波器后，就得到了一个 100~1000KHz，频率间隔为 100KHz 的 10 个输出信号频率。这样，我们只用了一个固定窄带滤波器，依靠调节 LC 辅助振荡器的十挡频率，就产生出我们所需要的 10 个谐波频率，达到了可变倍频的目的。这些频率的稳定度与 5MHz 晶振频率的稳定度相关，而与 LC 辅助振荡器的频率稳定度无关。这是因为辅助振荡器频率在环路中经过两次差拍变频后被抵消掉了，自然其频率的不稳定的漂移值也同样被消除了。所以，这个方法称频率漂移抵消法。图 1-8 中虚线的方框取代了图 1-4，图 1-5 中一个 10 级选频器。这样，就解决了制作大量高质量的滤波器的困难。这个方法仍属于混频滤波直接合成法中的一种。在直接法频率合成中使用极广泛。

(5) 脉冲锁相式合成法：

脉冲锁相式频率合成器是一个脉冲控制振荡器的锁相环路，简称 IGO 环路。如图 1-9 所示，标准的 5MHz 晶体振荡器经固定的除 50 分频得 100KHz 的基准信号，然后经脉冲形成电路产生 100KHz 的窄脉冲，根据频谱分析理论可知，它含有极其丰富的谐波分量。压控振荡器的输出频率与基准频率的谐波在脉冲鉴相器里进行相位比较，当压控振荡器的频

率调到接近于基准信号频率的任意一个谐波分量时，锁相环路就能自动把振荡器的频率锁定到这个谐波的频率上。例如，当压控振荡器频率调到接近于基准频率 100KHZ 的 256 次谐波时，振荡器频率就能自行锁定在 25.6MHZ 频率上，其余类推，这些输出频率的稳定度与准确度和标准晶振是一样的，这种合成法的最大优点是简单，指标也可以做得较高。但是，由于它是利用基准频率的谐波作为参考标频，因而要求压控振荡器的精度在 $\pm 0.5f_r$ 以内，如超出这个范围就会锁定在相邻谐波频率上去，这样造成选择讯道较麻烦。此外，对压控振荡器的调谐机构要求也较高，并且倍频次数越高，分辨力就越差。因此，这种方法提供的讯道数量是有限的。

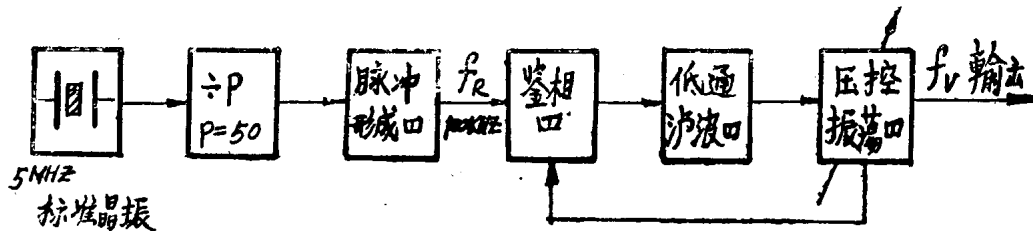


图 1-9 脉冲锁相式合成法可变倍频技术原理方框图

脉冲锁相式频合器实际上是一个可变倍频器，因为压控振荡器的输出频率 $f_v = mf_r$ 而 m 为倍频次数，是正整数。因此，这种合成法也可以代替图 1-4，图 1-15 的相加技术与相减技术合成法中的十进制选频器来使用。这种方法在频率合成技术中的使用相当广泛。

至此，我们简单地介绍了频率合成技术的基本原理和产生频率的各种方法。频合器归纳起来分为两大类，第一类是直接合成法，是利用混频滤波的原理直接产生的，也称混频滤波法。第二类是间接合成法，是根据锁相环路的原理，由压控振荡器产生输出频率，这个输出频率由参考的晶体振荡器的标准频率来锁定的，故也称锁相法。而数字式合成法是属于锁相法中的一种特殊情况。这些频率合成法都各有优缺点，在频率合成器中都获得广泛使用，待我们学完本课程后，就会清楚知道它们的应用与优缺点。在实际工作中，应根据使用场合的不同要求和需要，以及实际情况的可能，适当选择一二种方法来制作频合器。

§ 1-4 频率合成器的应用

频合器的用途极为广泛，它特别适用于作为现代无线电通信中收发讯机的本地振荡器，是现代通信设备中的标准频率源的供应系统。它也可以作为无线电测量仪器的标准频率的讯号源。还可以做人造地球卫星与导弹跟踪系统中用的变频振荡器。在移动目标指示雷达，利用甚低频传输和接收的远程导航，以及无线电干扰测量等方面，若不是使用了频率合成器的话，它们就不可能发展到现在的水平。而发展和调试这些先进的新设备，也必须使用频率合成器作为精确的标准讯号发生器。总之，频率合成技术是近代无线电技术发展中的一门新技术，具有广阔的前途。特别是近来数字化技术，半导体集成技术的发展，数字式频率合成器更具有无限的发展前景。

本章复习思考题:

1. 为什么单边带电台必须采用频率合成技术?
2. 什么叫频率合成? 频率合成器的基本含义是什么?
3. 频率合成器在单边电台中的功能是什么?
4. 频率合成的基本原理是什么? 如何分类?
5. 直接式频率合成法和间接式频率合成法的基本原理有何不同?
6. 相加技术合成法和相减技术合成法的基本原理? 有何区别?
7. 数字式频率合成法是根据什么原理? 有何特点?
8. 频率漂移抵消法的原理如何实现? 有何特点?
9. 为什么要采用频率漂移抵消法?
10. 脉冲锁相式频率合成法是根据什么原理来实现的? 它有什么特点?