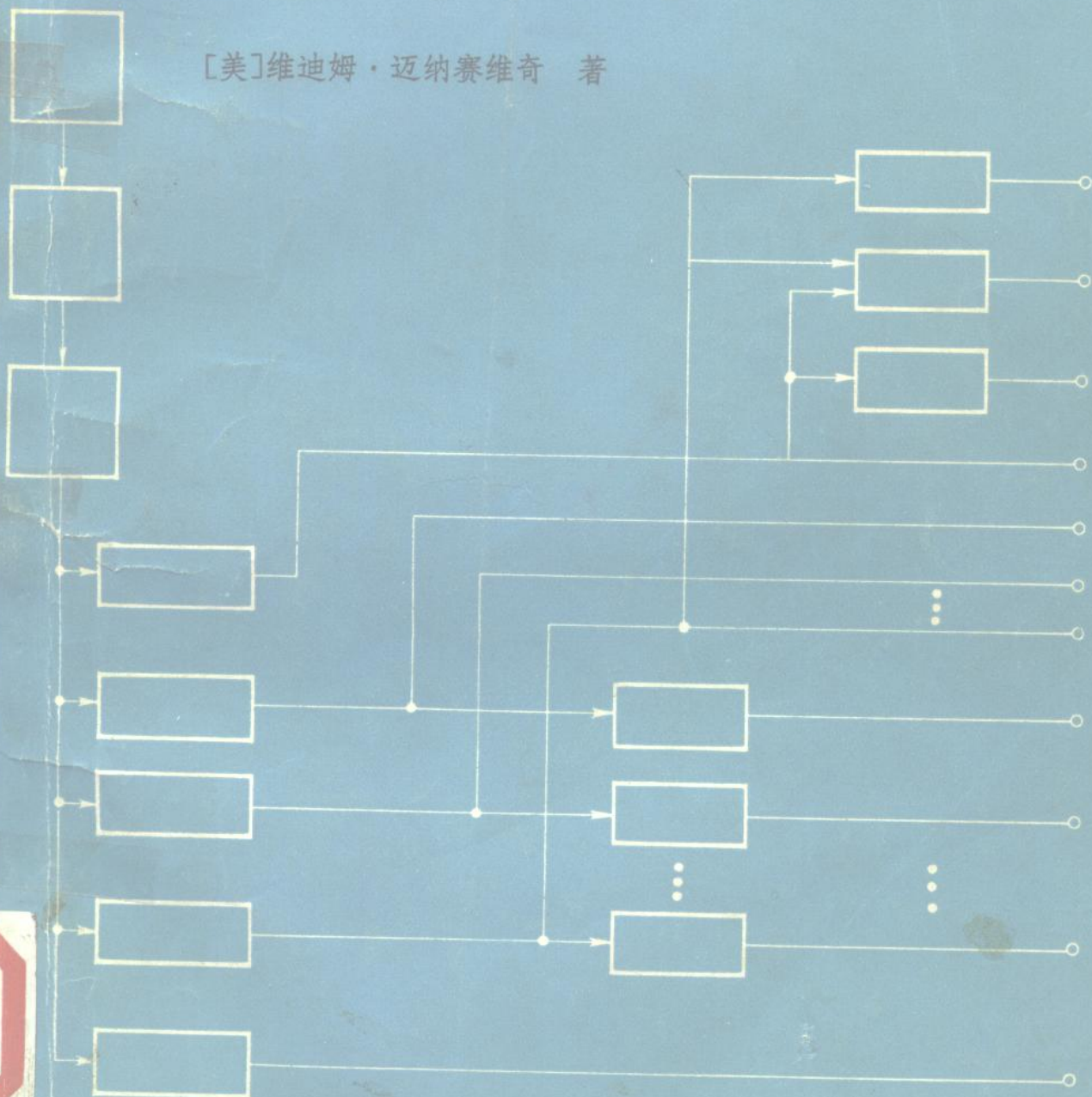


# 频率合成器

—理论与设计—

[美]维迪姆·迈纳赛维奇 著



机械工业出版社

66

73. 766  
919

# 频率合成器

— 理论与设计 —

[美] 维迪姆·迈纳赛维奇 著  
郑绳榷 杜文陞 李斌祥 译  
尤婉英 校订



机械工业出版社

**Frequency Synthesizers**  
**Theory and Design**  
Vadim Manassewitsch  
John Wiley & sons 1976

\* \* \*  
**频率合成器**  
**—理论与设计—**  
(美) 维迪姆·迈纳赛维奇 著  
郑绳棹 杜文陞 李斌祥 译  
尤婉英 校订

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)  
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)  
重庆印制一厂印刷  
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*  
开本 787×1092 1/16·印张18<sup>3</sup>/<sub>4</sub>·字数459千字  
1982年6月重庆第一版·1982年6月重庆第一次印刷  
印数 0,001—4,400·定价1.95元

\* \* \*  
统一书号: 15033·5106

## 前 言

由于现代频率合成器固有的优越性，即能从一个高稳定性和准确度的标频产生千百万个同一稳定性和准确度的频率。因此频率合成技术得到了日益广泛的应用，例如通讯、导航、雷达、电视、电子侦察、干扰、宇宙航行、遥控遥测以及现代化的仪器仪表工业都离不开这门先进的科学技术。美国维迪姆·迈纳赛维奇 (Vadim Manassewitsch) 所著《频率合成器理论与设计》是这方面的一本很好的基础教材。

作者在这本书里运用了深入浅出的手法，由理论到实践，由公式到图表曲线，全面系统地阐述了有关频率合成各方面的问题。本书的前三章论述了各种频率合成法，寄生信号与相位噪声的产生及实际条件下寄生信号的传输过程、测量方法、抑制技术等。四、五、六三章详细论述了模拟锁相环、数字锁相环及各种基本电路，例如射频放大器、混频器、倍频器、分频器、压控振荡器、鉴频器和鉴相器等工作原理、性能分析以及设计方法，并给出了相应的设计例子。最后二章介绍了目前国外常用的几种新型频率合成器，并专门研究了标频问题，可作为前几章内容的应用和补充。该书是一本很有参考价值的著作，可作为高等院校无线电和电子工程系有关专业的教师、研究生、高年级学生的教学参考书，并可供有关科研和工程技术人员参考。

本书由东北重型机械学院郑绳植(序言、第一、二、四章)、李斌祥(第三、七章)、杜文陞(第五、六、八章)三同志翻译，由清华大学尤婉英副教授校订，由邱锦来同志担任责任编辑。

由于译者水平所限，缺点和错误在所难免，恳切希望读者批评指正。

## 原 序

本书的目的，是向从事通讯、雷达、电子侦察以及其他各种使用频率合成器部门工作的工程技术人员，提供训练教材和参考资料。由于这些装置越来越复杂，就日益需要一门有关频率发生和控制方面的基础课程。本书可作为这门课程的教本，要求读者具有大学毕业的水平。

为使内容编排尽可能做到系统性，第一章叙述了许多频率合成方法，说明了诸如混频器、振荡器、倍频器及分频器等各种组合单元在频率发生过程中是如何应用的，这对学习后面各章节的内容是非常有意义的。叙述了各种频率合成法之后，继之以第二章的系统分析，因为系统设计的知识，例如相位噪声和寄生信号的产生等，对于给定的一组技术指标选择最好的合成方法是十分重要的。根据同样的理由，第三章研究了实际条件下寄生信号的传输问题。后面的四、五、六三章，详细介绍了各种电路的设计方法。在第七章中叙述一些新式的频率合成器时，以前各章内容都得到了充分的应用。

迄今为止，参考源总是合成器整体的组成部份。但是，由于出现了只有原子标频才能满足的对频率稳定性和准确度的要求，参考信号源就自成为一个独立的体系。因此，最末一章专门论述了参考信号源问题。

最近20年中，两种新技术的出现，彻底改革了频率发生和控制方面的设计惯例：首先是发明了频率合成法，这才有可能产生数百万个离散频率，它们的稳定性与准确度与参考振荡器完全相同；其次是研制成超稳定性和准确度的参考源，由它来决定数百万个频率的稳定性与准确度。模拟和数字电路在设计和制造方面的各种新成就，例如中规模和大规模集成技术，都对合成器的成本、体积、重量以及功耗等产生强烈的影响。YIG<sup>⊖</sup>调谐滤波器和振荡器的出现，已经使微波合成器的设计大为简化。本书扼要地介绍了在频率发生和控制方面的最新进展。书中以美国及其他国家现行的设计惯例为基础。

我要感谢我从前和现在的一些同事，他们和我一起讨论了设计合成器的各种问题，使我熟悉了书中所叙述的电路设计方法，从而为本书做出了贡献。我特别要感谢弗吉尼亚·斯普里格斯 (Virginia Spriggs) 夫人，她细致地阅读了本书手稿，并对写作风格提出了一些宝贵的意见。

维迪姆·迈纳赛维奇

⊖ YIG 为 *yttrium iron garnet* 的缩写，即钇铁石榴石——译者

# 目 录

<p>第一章 频率合成..... 1</p> <p>  1-1 非相干合成..... 1</p> <p>  1-2 直接相干合成..... 4</p> <p>    强制合成法..... 4</p> <p>    谐波法..... 5</p> <p>    双混频法..... 6</p> <p>    三混频法..... 7</p> <p>    双混频-分频法..... 9</p> <p>  1-3 间接相干合成..... 13</p> <p>    模拟锁相环..... 13</p> <p>    数字锁相环..... 18</p> <p>  1-4 结论..... 22</p> <p>第二章 系统分析..... 25</p> <p>  2-1 寄生输出..... 26</p> <p>    幅度调制..... 26</p> <p>    单音频率和相位调制..... 27</p> <p>    混频器中的互调分量..... 31</p> <p>    倍频器中的寄生信号..... 36</p> <p>    分频器中的寄生信号..... 39</p> <p>    理想限幅器中的寄生信号..... 41</p> <p>    调幅-调相变换..... 43</p> <p>    简单寄生信号分解为调幅和       调频分量..... 48</p> <p>    工频寄生输出..... 50</p> <p>    减少寄生输出的方法..... 51</p> <p>    测量寄生输出的方法..... 52</p> <p>  2-2 相位噪声..... 54</p> <p>    频率源的稳定性..... 54</p> <p>    噪声类型..... 57</p> <p>    振荡器中的相位噪声..... 59</p> <p>    射频放大器和倍频器中的       相位噪声..... 62</p> <p>    限幅器中的噪声..... 65</p> <p>    分频器中的相位噪声..... 66</p> <p>    减少相位噪声的方法..... 67</p> <p>    测量相位噪声的方法..... 68</p> <p>  2-3 带宽-转换速度的考虑..... 77</p>	<p>  2-4 测量合成器转换时间的方法..... 78</p> <p>  2-5 系统设计的一个例子..... 79</p> <p>第三章 屏蔽..... 89</p> <p>  3-1 静电场..... 90</p> <p>    无屏蔽..... 90</p> <p>    静电屏蔽..... 92</p> <p>    未接地或接地不良的屏蔽..... 93</p> <p>    罩屏蔽..... 93</p> <p>    由距离提供的屏蔽..... 94</p> <p>  3-2 电磁场..... 94</p> <p>  3-3 磁场..... 94</p> <p>  3-4 电磁屏蔽..... 96</p> <p>    屏蔽效率..... 96</p> <p>    对近场的屏蔽..... 96</p> <p>    对远场的屏蔽..... 103</p> <p>    屏蔽的间断..... 103</p> <p>  3-5 设计要考虑的问题..... 105</p> <p>    组装..... 105</p> <p>    衬垫..... 107</p> <p>    腐蚀与喷镀使屏蔽效率下降..... 109</p> <p>    屏蔽材料..... 112</p> <p>    射频导线的干扰..... 113</p> <p>    脉冲干扰..... 121</p> <p>第四章 模拟锁相环..... 132</p> <p>  4-1 反馈系统的基本原理..... 132</p> <p>  4-2 锁相环性能..... 136</p> <p>    传递函数..... 137</p> <p>    一阶锁相环..... 138</p> <p>    二阶锁相环..... 142</p> <p>    具有理想积分器的二阶锁相环..... 146</p> <p>    捕捉..... 150</p> <p>    模拟锁相环的稳定性..... 152</p> <p>  4-3 相位噪声..... 157</p> <p>  4-4 寄生输出..... 159</p> <p>    幅度调制..... 159</p> <p>    相位调制..... 159</p> <p>    与锁相环最终输出无关的寄生</p>
--	---

信号 .....	159	正弦鉴相器 .....	227
4-5 设计模拟锁相环的例子 .....	160	取样-保持比相器 .....	228
<b>第五章 数字锁相环 .....</b>	<b>164</b>	6-8 鉴频器 .....	232
5-1 数字锁相环的性能 .....	164	福斯特-西利(Foster-Seely)鉴频器 .....	232
传递函数 .....	165	平衡鉴频器 .....	235
一阶锁相环 .....	166	6-9 锁相环捕捉扫描电路 .....	235
二阶锁相环 .....	168	单晶体管张弛振荡器 .....	236
具有理想积分器的二阶锁相环 .....	170	多谐振荡器 .....	238
5-2 设计考虑 .....	172	6-10 压控振荡器调谐电路 .....	239
<b>第六章 基本电路 .....</b>	<b>179</b>	<b>第七章 频率合成器 .....</b>	<b>244</b>
6-1 调谐放大器 .....	179	7-1 非相干合成器 .....	244
6-2 射频混频器 .....	184	7-2 相干合成器 .....	248
晶体管混频器 .....	185	645A型高频合成器(John Fluke	
场效应管混频器 .....	186	制造公司制造) .....	248
二极管混频器 .....	187	5105A/5110B型特高频合成器	
参量混频器 .....	189	(Hewlett-Packard	
6-3 倍频器 .....	194	公司制造) .....	254
晶体管倍频器 .....	194	GI/ESD数字合成器 .....	257
饱和线圈倍频器 .....	195	7-3 微波合成器 .....	262
阶跃恢复二极管倍频器 .....	196	Systron-Donner 1600系列特高	
锁相环式倍频器 .....	200	频-超高频合成器 .....	266
6-4 分频器 .....	201	WJ-1250型特高频-超高频合成器	
再生式分频器 .....	201	(Watkins-Johnson公司制造) .....	270
锁定振荡器分频器 .....	202	<b>第八章 参考频率源 .....</b>	<b>277</b>
数字式分频器 .....	203	8-1 晶控振荡器 .....	277
载流子存储二分频器 .....	206	8-2 原子标频 .....	282
参量二分频器 .....	209	304D型铷原子标频(Tracor	
锁相环式分频器 .....	211	有限公司制造) .....	282
6-5 压控振荡器 .....	211	5061A型铯束标频(Hewlett-	
考尔匹兹振荡器 .....	212	Packard公司制造) .....	285
传输线压控振荡器 .....	219	附录 .....	290
6-6 晶控振荡器的频率牵引技术 .....	222		
6-7 鉴相器 .....	227		

# 第一章 频率合成

频率合成，就是利用电子元件组成某种装置，以便由一个或几个参考源产生一个或许多频率的过程。早期的合成器，是由一组晶体组成的晶控振荡器，晶体用人工来接入和断开，它的频率准确度和稳定度由晶体的频率准确度和稳定度来决定，很少与电路有关。

这种多晶体压控振荡器被一种目前叫做非相干的合成法所淘汰。在非相干合成中，虽然还使用晶控振荡器，但它的工作方式是以少量的晶体产生许多频率。

做了这些改进以后，迅速发展的通讯部门又提出了研制更为完善的，频率准确度和稳定度比非相干合成高几个数量级的频率发生装置的要求。为了满足这些要求，出现了一类叫做相干合成的方法。顾名思义，相干合成法就是由一个准确度和稳定度达到要求的参考源产生许多频率的方法。

上述方法，都会产生寄生输出。寄生输出必须通过选择适当的合成频率来消除并用滤波法来抑制。相位噪声是不能忽略的。

当学习了更多的合成法之后，就会认识到，除地面及空间通讯外，在其他装置，例如多普勒雷达也可能利用频率合成。程序化的高速频率转换能力，扩大了合成器在实验室以及生产中对测试电子电路及设备时的应用，例如用来测试窄带滤波器和检验多路遥测装置。

在满足各种应用和变换技术的需要过程中，频率发生装置就变得越来越复杂，成本越来越高，实现起来也越来越困难。第七章中，对这些装置的技术要求作了比较详细的讨论，并介绍了目前常用的各种合成器。本章的目的，是让读者熟悉有关产生频率增量的一些基本概念。

## 1-1 非相干合成

在非相干合成中，由输入频率产生输出频率的方式随着应用的不同而变更。输出频段、最小频率增量、频率稳定度和准确度、寄生输出的电平、尺寸、成本和功耗等，都是选择合成方法的决定因素。但是非相干合成的主要目的，在所有情况下都是为了降低成本，为了减少在合成器中所使用的晶体及基本组合单元，诸如振荡器、混频器和滤波器等数目。

下面讨论非相干合成的一个典型例子，用以说明该方法的局限性以及与它有关的设计问题。感兴趣的读者，可以参阅林德豪尔姆 (Lindholm)、罗斯 (Ross) 以及拜尔塔斯 (Baltas) 等著作中 [参考资料 1-3] 有关这一课题的更为广泛的论述。

图 1-1 是非相干合成的方框图，它与 H·格兰格 (H·Granger) 研制出来的装置 [参考资料 3] 相类似。这种非相干合成利用了逐次差拍原理，左边混频器的输出是两个输入频率之和

$$f_{n-1} + f_n + \frac{(\Delta f_{0-s})_{n-1}}{10^{n-2}} + \frac{(\Delta f_{0-s})_n}{10^{n-1}}$$

本书自始至终用符号  $\Delta f_{0-s}$  表示从基频  $\Delta f = 0$  开始的 10 个频率增量。例如用  $f_n +$



$(\Delta f_{0-9})/10^{n-1}$  表示第  $n$  个振荡器所能产生的 10 个频率:

$$f_n, f_n + \frac{(\Delta f_1)_n}{10^{n-1}}, f_n + \frac{(\Delta f_2)_n}{10^{n-1}}, \dots, f_n + \frac{(\Delta f_9)_n}{10^{n-1}}$$

选用这种表示法, 是为了描述每个振荡器所产生的频率在最后输出频率数字中的相对位权, 以及在合成器通道上各数字的配置情况。同样, 因为图中每个振荡器都有单独的控制电路, 所以都能独立进行调整。因此, 可以同时产生下列频率分量

$$f_n + \frac{(\Delta f_0)_n}{10^{n-1}} \quad \text{和} \quad f_{n-1} + \frac{(\Delta f_0)_{n-1}}{10^{n-2}}$$

带下标的括号, 表示  $\Delta f_{0-9}$  在输出频率表达式中的位置。这样一来, 总是把  $(\Delta f_{0-9})_n$  作为该表达式的最低有效位。

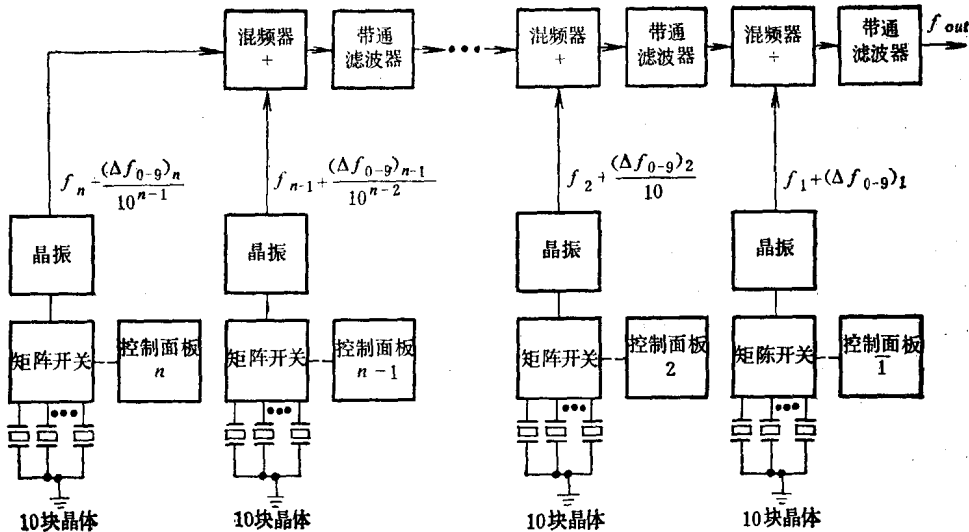


图 1-1 非相干合成

图 1-1 中未画出的下一个混频器的输出, 仍然是它的两个输入频率之和

$$f_{n-2} + f_{n-1} + f_n + \frac{(\Delta f_{0-9})_{n-2}}{10^{n-3}} + \frac{(\Delta f_{0-9})_{n-1}}{10^{n-2}} + \frac{(\Delta f_{0-9})_n}{10^{n-1}}$$

最后输出是所有各频率之和

$$f_{out} = f_1 + f_2 + \dots + f_n + \frac{(\Delta f_{0-9})_1}{10} + \dots + \frac{(\Delta f_{0-9})_{n-1}}{10^{n-2}} + \frac{(\Delta f_{0-9})_n}{10^{n-1}} \quad (1-1)$$

为了说明方便起见, 规定每个振荡器都带有 10 块晶体, 然而, 采用任何其他数目的晶体也能达到同样的目的 [参考资料 1 和 3]。

图 1-2 的数字例子说明这种方法的实际工作情况。例中假定, 技术指标只要求输出频段为 58 到 59 兆赫以及最小的频率增量为 1 千赫。为了产生  $10^3$  个频率, 应使  $n=3$ 。通常, 由给定的寄生输出电平来选择  $f_1$  到  $f_n$ , 但为了简单起见, 可以忽略这种要求。

设

$$f_1 = 47.0 \text{ MHz}$$

$$f_2 = 6.0 \text{ MHz}$$

$$f_3 = 5.0 \text{ MHz}$$

为产生 1 千赫的频率增量

$$\frac{(\Delta f_1)_n}{10^{n-1}} = \frac{(\Delta f_1)_3}{10^2} = 1 \text{ kHz}$$

或

$$\Delta f_1 = 0.1 \text{ MHz}$$

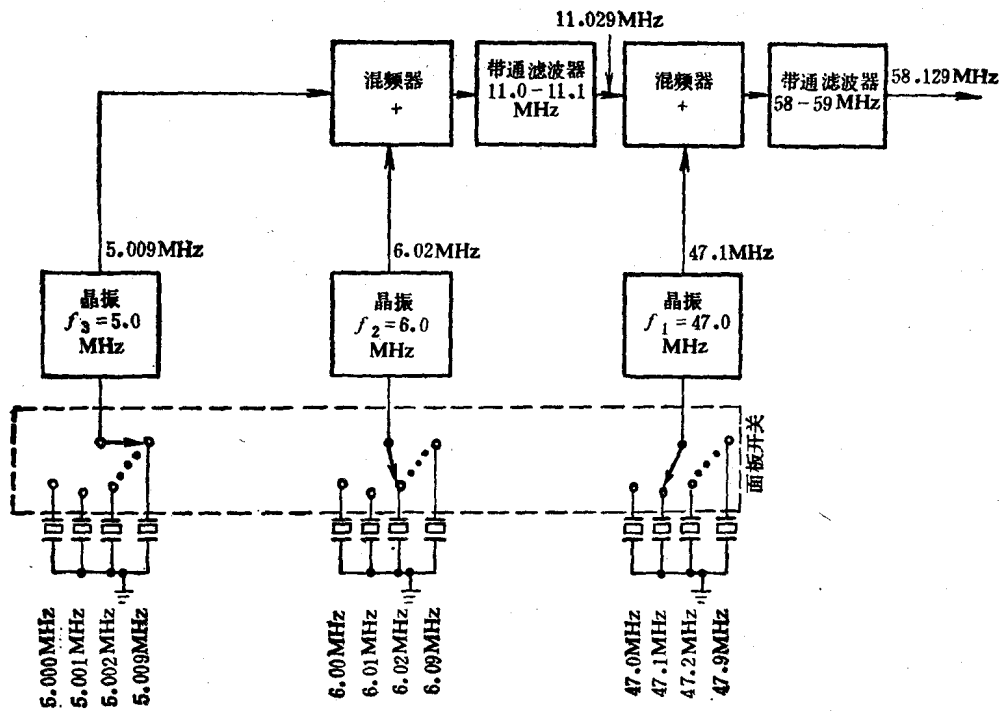
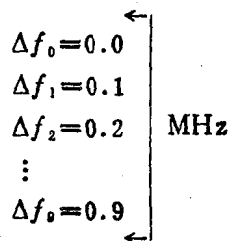


图 1-2 非相干合成的例子

因此



把  $(\Delta f_{0-9})$  中的各有关项调整到  $(\Delta f_0)_1 = (\Delta f_0)_2 = (\Delta f_0)_3 = 0$  并利用式 1-1, 算出最低输出频率为

$$(\Delta f_{out})_{min} = 47 + 6 + 5 = 58.0 \text{ MHz}$$

类似地, 把  $(\Delta f_{0-9})$  中的各有关项调整到  $(\Delta f_0)_1 = (\Delta f_0)_2 = (\Delta f_0)_3 = 0.9$  兆赫, 可以求出最高输出频率

$$(\Delta f_{out})_{max} = 47.9 + 6.09 + 5.009 = 58.999 \text{ MHz}$$

如果需要 58.129 兆赫，应把  $(\Delta f_{0-9})$  中的各有关项作如下调整

$$(\Delta f_{0-9})_1 \text{ 调整到 } (\Delta f_1)_1 = 0.1 \text{ MHz}$$

$$(\Delta f_{0-9})_2 \text{ 调整到 } (\Delta f_2)_2 = 0.2 \text{ MHz}$$

$$(\Delta f_{0-9})_3 \text{ 调整到 } (\Delta f_3)_3 = 0.9 \text{ MHz}$$

因而得到

$$f_{out} = 47.1 + 6.02 + 5.009 = 58.129 \text{ MHz}$$

在要求宽频段的场合下，应当使用更多的振荡器—混频器级。

该方法利用了和外差原理，因此，输出信号的频率稳定度、准确度和相位噪声是各振荡器的稳定度，准确度和相位噪声的和。联合利用和外差及减外差原理，以及采用老化工艺和晶体频率牵引技术，能有效地改善稳定度和准确度。由于非相干的固有特性，只有改善各电路的噪声性能，才能减少输出信号的相位噪声。

应当特别小心寄生输出。混频过程中产生无穷多的不需要的互调分量，其中有一些是低阶的，而且可能落在通频带内。选择适当的频率可以把这些分量移到通频带之外，从而被滤波器滤除。因此，分析寄生输出是十分重要的，而且是设计一开始就要进行的工作。寄生输出问题在第二章中给以详尽地论述。图 1-1 中从  $f_1$  到  $f_n$  的选择主要由这一要求来决定。

非相干合成法的主要优点是成本低。

## 1-2 直接相干合成

非相干和相干合成之间的主要差别是在产生频率过程中所用频率源数目的不同。非相干合成用了许多晶控振荡器，而相干合成只使用一个参考频率源。因此，在直接相干合成装置中，输出频率的稳定度和准确度与参考源相同。

研制由稳定度为  $10^{-9}$ /日，准确度为  $\pm 5 \times 10^{-7}$ （五年前的要求）的  $10n$  块可开关晶体所组成的  $n$  个晶控振荡器，将是一个非常复杂的任务，而且成本过高，说明这种做法是不经济的。但是，研制只有一块晶体的晶控振荡器，并用该振荡器去激励其他电路，是一件较为容易的工作。目前，市场上用相当低的价格就能买到稳定度达  $10^{-9}$ /日的参考源。

由一个参考源产生全部频率，这一特点使得相干合成成为必不可少的了。

### 强制合成法

每当需要产生少量频率的时候，习惯上总是采用强制合成法或谐波法，如果这些频率必须同时产生的话，选用强制法较好。

强制合成法所使用的基本组合单元是倍频器、分频器、混频器和一个参考源。图 1-3 就是强制合成法的一个例子，为了清楚起见，放大器和滤波器在图中没有表示出来。然而还有许多别的方法可以产生 20.0、21.5、22.0、23.5、24.0 和 25.5 兆赫这样六个频率。对于有兴趣的读者，如果能证明用图 1-3 的方法产生这些频率不是最佳方案，也就是说，还有别的需要更少组合单元的方法，将是一次很好的练习。不幸的是，对设计者来说，最佳系统的定义不是十分明确的。可能发生这样的情况，组合单元较少的系统是一个较贵的方案，这是因为要使系统工作必须用上滤波器、放大器和隔离器，把它们计算在成本内时，就出现了上述情况。因此，只有在研究了各种方法，详尽地进行了系统和电路的分析，明确了所有电路的作用，确

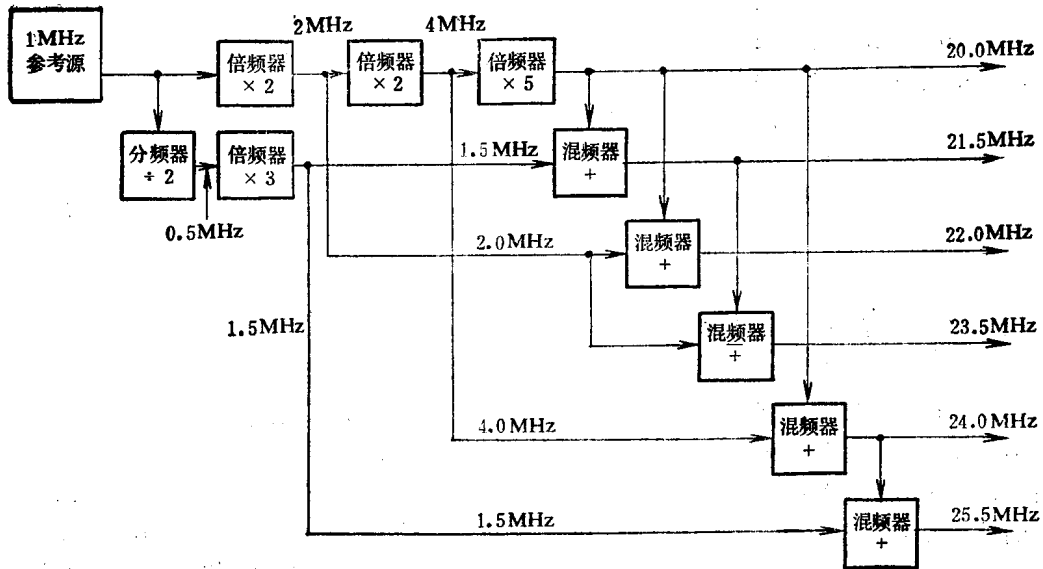


图 1-3 强制合成的例子

定了每种方法的成本之后，才能选择出一种最便宜的方案。

强制法能用模拟和数字两种电路来实现[参考资料 4 到 6]。

强制合成法存在两个基本问题：(a)在混频、倍频和分频过程中会产生寄生输出；(b)相位噪声。这些问题放在第二章中讨论。

在合成器中广泛利用这种方法以产生各种辅助频率。

### 谐波法

当任意两个相邻输出频率的间隔始终保持同一数值时，总是选用谐波法而不用强制法。尤其是各输出频率是这个间隔的某一倍数，且在某特定时刻只要求输出一个频率，例如，在某一时刻只需产生五个频率——20、21、22、23和24兆赫——中的一个频率，就应当采用谐波法。谐波法包括两个基本步骤：(a)产生一个具有高次谐波的信号（通常是一脉冲串），其基频等于频率间隔；(b)选择所要的谐波。有许多方法可以把参考源的正弦信号变为一脉冲串，其中的两种方法在第六章中介绍。本节讨论图1-4所示的三种实用谐波选择法。

图中表达式  $\sum_{m=x_1}^{x_2} mf_r + R$  用来描述具有高次谐波的输入信号。在某一时刻，通过滤波器的谐波是  $x_1 f_r$  到  $x_2 f_r$  中的一个，被滤波器抑制的其余谐波用  $R$  来表示。

每当两相邻谐波之间的频率间隔大于输出频率  $mf_r$  时，总是采用图1-4a的无源滤波器来选择谐波，于是用极少的滤波器就能达到衰减无用谐波的要求。具有许多极点的可调窄带滤波器价格昂贵并且难以实现。

当频率间隔很小时，则用图1-4b的双混频法。这种方法是把一脉冲串加到差频混频器的信号端，本振输入信号由调谐振荡器提供。调谐振荡器的频率  $f_{TO}$  总是比输出频率  $mf_r$  少一固定的数值  $f_{IF}$ 。接在混频器后面的带通滤波器用来衰减不需要的谐波。最后，把选择出来的谐波向上变换到它原来的数值  $mf_r$ 。

与无源滤波法相比较，双混频法有很多优点。用来衰减无用谐波的带通滤波器工作在单

一频率上，而调谐（人工或远距离）则由调谐振荡器来实现。利用向下变换输入频率的方法，可使频率间隔成倍地增加，从而使滤除无用谐波成为可能。这种滤波器的调谐范围可以延伸到一个倍频程。

假设把调谐振荡器的频率调谐到要求的  $f_{TO}$  附近，使得  $f_{IF}$  落在窄通带内，那么调谐振荡器对输出信号的稳定度、准确度和相位噪声的影响被双混频法所抵消。这一点可用下列方程来证明

$$\begin{aligned} f_{IF} &= mf_r - f_{TO} \\ f_{out} &= f_{IF} + f_{TO} \\ &= mf_r - f_{TO} + f_{TO} \\ &= mf_r \end{aligned}$$

正如所预料的那样， $f_{TO}$  从  $f_{out}$  的表达式中消失了。

只有输入信号的噪声电平非常低，或者混频器及有关电路不是工作在最佳状态时，才有可能使通过这种滤波器的相位噪声变劣。

该方法所产生的寄生输出，正如任何一种利用外差法的电路一样严重，应当认真研究。

当工作频率间隔小到这种程度，以致无论是无源滤波器，还是双混频滤波器都不能衰减无用的谐波时，图1-4c所描绘的锁相环法就特别有用。这种方法不存在寄生输出问题，因为它不需要混频器、倍频器和分频器，但它存在着泄漏问题。为了确定对放大器所要求的隔离程度（或反向增益），应当计算或测量通过鉴相器，并经由放大器-隔离器泄漏到滤波器输出端的无用谐波分量值，还要分析锁相环（PLL）的稳定性以确定环路的衰减程度。

因为PLL是二阶系统，当信号通过它时，滤波器不能改变输入信号的稳定性和准确度，然而相位噪声却变化了。PLL中的相位噪声在1-3节、第四章和第五章中叙述。这里应当说明的是，在高于环路带宽的所有偏移信号的频率上，锁相环滤波器对与输入信号有关的噪声谱的影响，是用压控振荡器（VCO）的噪声谱代替输入信号的相位噪声谱。

合成器中广泛应用这种方法以产生辅助频率。

### 双混频法

具有抵消漂移作用的双变频原理，已经在收音机中使用了一些时候〔参考资料8〕。它曾在谐波合成的那节中作了叙述，这里不再复述。这种方法简单明了，并具有能够以相当低的造价应用到微波波段中去的优点。

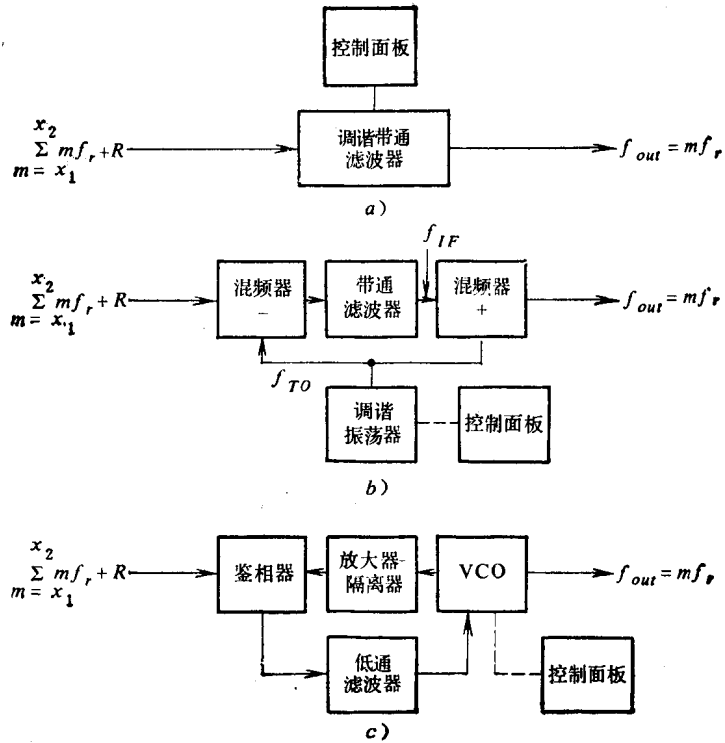


图 1-4 谐波合成

a) 无源滤波器 b) 有源滤波器，双混频法 c) 有源滤波器，锁相环法

### 三混频法

在频率合成中，设计目标之一就是要研制，而且已经研制出一种能重复应用的标准组合单元的方法。这种方法具有很多优点，能降低设计、研制以及生产的成本，缩短试制时间，还能简化合成器的操作调整和修理手续。三混频法就是为满足这一要求而研究出来的。

图 1-5 是十进单元典型电路的方框图，十进单元能被重复使用以产生任何所要求的频率增量。它是双混频法的改型，因此它按抵消漂移作用的原理工作。在频率固定的窄带滤波器的输出端接入一个和频混频器，以便在信道中注入下一个较低阶的频率增量。左边混频器输出端所选出的频率为

$$f_{IF1} = f_{in} + (\Delta f_{0-9})_1 - f_{T0}$$

下一个和频混频器的输出为

$$f_{IF2} = f_{in} + (\Delta f_{0-9})_1 - f_{T0} + f + \frac{(\Delta f_{0-9})_2}{10}$$

有频移的输出频率为

$$f'_{out} = f_{in} + f + (\Delta f_{0-9})_1 + \frac{(\Delta f_{0-9})_2}{10} \quad (1-2)$$

读者请注意，正如所期望的那样， $f_{T0}$  从  $f_{out}$  的表达式中消失了。

符号  $\Sigma f_{in} + (\Delta f_{0-9})_1$  表示  $f_{in} + (\Delta f_0)_1$ 、 $f_{in} + (\Delta f_1)_1$ 、 $\dots$ 、 $f_{in} + (\Delta f_9)_1$  在输入端同时出现。

在某些应用场合〔参考资料 9 到 12〕，出现频移  $f$  不见得不恰当，但每当使用级联的十进单元时，频移累加的结果，总是把输出频率改变到这样的程度，以致在以后的合成中，该频率不能再应用。根据这一理由，图中接入另一个带有滤波器的差频混频器（用虚方框表示），它的作用就是消除这个频移。

无频移的输出频率为

$$f_{out} = f_{in} + (\Delta f_{0-9})_1 + \frac{(\Delta f_{0-9})_2}{10} \quad (1-3)$$

图 1-6 表明了利用三混频法产生  $n$  个频率增量的基本方案。注意，虽然在三个混频十进单元的输入端同时加上了具有同样频谱的信号  $\Sigma f_{in} + \Delta f_{0-9}$ ，但对每个十进单元来说，频率增量均系独立产生，也就是说，括号外的下标 1、2、 $\dots$ 、 $n$  表明， $(\Delta f_0)_1$ 、 $(\Delta f_1)_1$ 、 $\dots$ 、

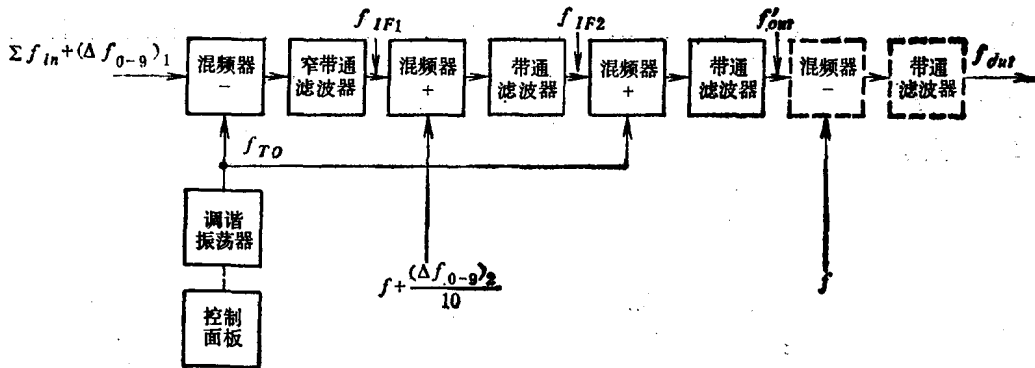


图 1-5 三混频合成

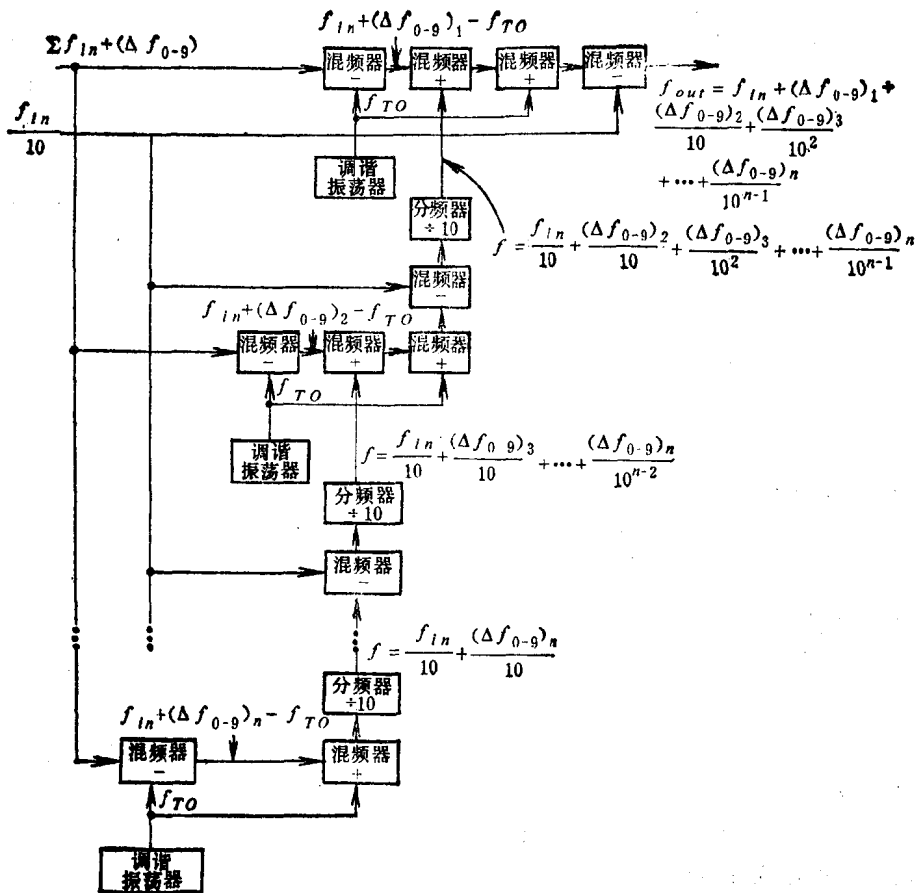


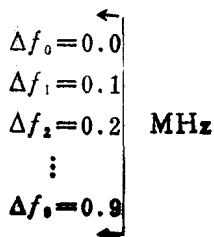
图 1-6 三混频合成器

$(\Delta f_{0-9})_1$  的选择与  $(\Delta f_{0-9})_2$ 、 $(\Delta f_{0-9})_3$ 、 $\dots$ 、 $(\Delta f_{0-9})_n$  无关。同理，增量  $(\Delta f_{0-9})_2$  是通过适当调整十进制调谐振荡器选择出来的，与  $(\Delta f_{0-9})_3$  无关。

图 1-7 是  $n=3$  时，三混频合成法的一个数字例子。频率增量调整在  $(\Delta f_{0-9})_1$ 、 $(\Delta f_{0-9})_2$  和  $(\Delta f_{0-9})_3$  的位置上。为了强调  $f_{TO}$  对合成器寄生信号技术指标的影响，没有选定调谐振荡器的频率  $f_{TO}$  的数值（有关寄生信号的产生和控制问题在第二章中给以详细讨论）。例中所有的三混频十进制单元都工作在同一频率上，其特点是允许在整个系统中重复使用相同结构的电路。

图中规定：

1.  $\Delta f_{0-9}$



## 2. $f_{in}=100\text{MHz}$

对双混频法的频率稳定性和准确度，寄生输出和相位噪声等所作的评价，同样适用于三混频法。由于三混频法需用大量的混频器，因此涉及到许多与滤波器有关的问题，所以很少用它来产生大量的频率增量。在这种情况下，最好选用一种更巧妙的，由 V.W. 鲍莱 (V. W. Bolie) 研制出来的方法 [参考资料 13]，该方法将在下面叙述。

### 双混频-分频法

与目前任何一种合成法不同，双混频-分频法能完全满足重复性的要求。因此毫不奇怪，如美国的 Hewlett-Packard 公司，John Fluke 制造公司以及别国的一些公司 (Rohde 和 Schwarz 等) 已经利用图 1-8 和 1-9 的方法或其改型，设计出各自的合成器来。

图 1-8 的基本电路是由两个和频混频器及一个分频器组成，输入信号  $f_{in}$  加到第一级混频器的输入端，本振信号  $f_1$  由参考源 (方框图中未画出) 用强制法产生。输入到第二混频器的信号是  $f_{in}$  及  $f_1$  的和，第二混频器的本振信号也用强制法由参考源输入，然而，它带来 10 个频率增量  $f_2 + \Delta f_{0-9}$ ，在某一时刻，由矩阵开关选出一个增量用于频率合成。 $f_{in}$ 、 $f_1$  和  $f_2$  的选择要满足对寄生输出的要求，并使

$$f_{in} = \frac{f_{in} + f_1 + f_2}{10} = \frac{f_1 + f_2}{9} \quad (1-4)$$

第二混频器的输出被 10 除。

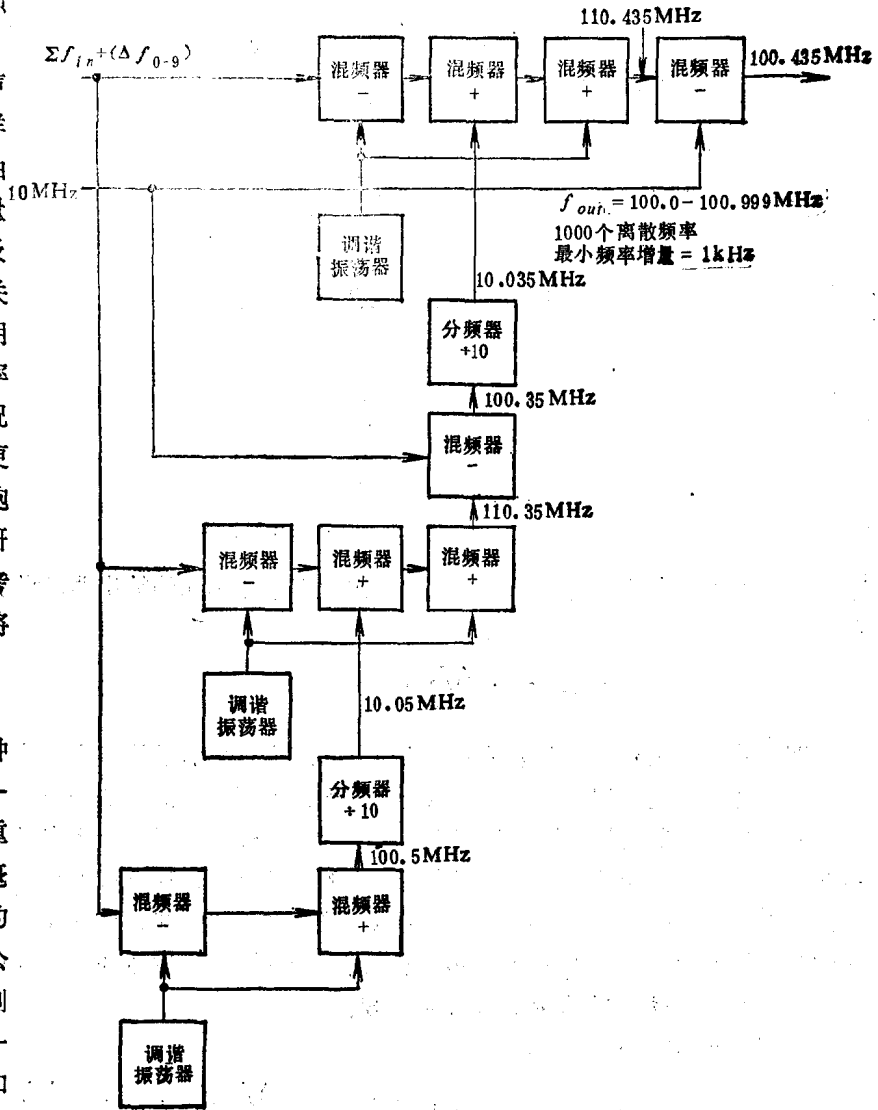


图 1-7 三混频合成的例子



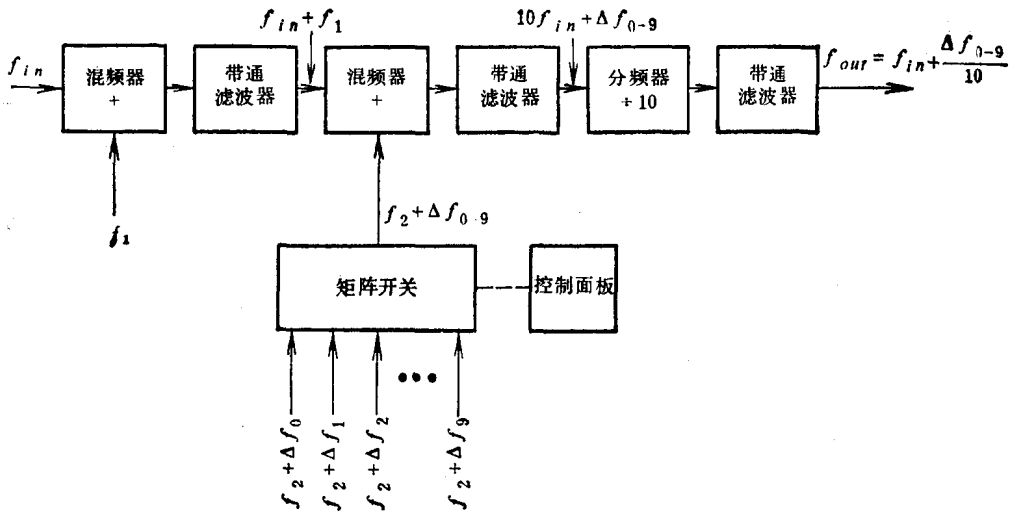


图1-8 双混频分频合成

在式 1-4 所表达的情况下，输入频率出现在十进单元的输出端仅增加了一个被 10 除的注入增量

$$f_{out} = f_{in} + \frac{\Delta f_{0-9}}{10} \quad (1-5)$$

图 1-9 说明在  $n$  个十进单元级联情况下，产生频率增量的方法。请注意，频率增量是用射频频转换的方法选择出来的，这一点与三混频法不同，三混频法是用调谐  $n$  个振荡器的方法产生的。当需要高速频率转换时，这是一个显著的优点。另一个优点是，从理论上分析，用级联无限个十进单元的方法可以产生无限小的频率增量，现已有小到 0.01 赫的商品合成器。微波合成器早已研制出来。微波分频可以用第六章叙述的锁相环分频器来实现。现在射频频开关的制造厂家应研制一种大容量的，各波道之间的隔离程度达 80 分贝以上的微波矩阵开关，以便使双混频-分频法能够应用到微波波段。

由图 1-9 可得到两种输出

$$(f_{out})_1 = 10f_{in} + (\Delta f_{0-9})_1 + \frac{(\Delta f_{0-9})_2}{10} + \dots + \frac{(\Delta f_{0-9})_n}{10^{n-1}} \quad (1-6)$$

和

$$(f_{out})_2 = f_{in} + \frac{(\Delta f_{0-9})_1}{10} + \frac{(\Delta f_{0-9})_2}{10^2} + \dots + \frac{(\Delta f_{0-9})_n}{10^n} \quad (1-7)$$

式 1-6 比式 1-7 更为常用，因为所产生的  $(f_{out})_1$  所占的频段比  $(f_{out})_2$  宽得多，能达兆赫范围。

R. R. 斯通 (R. R. Stone) 和 H. F. 哈斯汀斯 (H. F. Hastings) 已经导出在任意分频系数下输出频率的一般表达式 [参考资料 14 和 15]。本书没有给出这一表达式，因为实际上与设计混频-分频法有关的各种问题，已经通过一级十进单元的表达式 1-4 和 1-5 表示出来了。

这种方法有很多种改进方案，可以用一级和频与一级差频混频器来代替二级和频混频