

倍频器

与

分频器

[苏] И. X. 里茨金 著 邓亚桥 译

倍频器与分频器

〔苏〕И.Х.里茨金著

邓亚桥 译

刘忠民 刘圣民 校

人民邮电出版社

И.Х.РИЗКИН
УМНОЖИТЕЛИ И ДЕЛИТЕЛИ
ЧАСТОТЫ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «СВЯЗЬ» МОСКВА 1976

内 容 提 要

本书比较系统地论述了倍数变频器——倍频器与分频器的基本原理、构成原则、分析与设计方法。讨论了在无线电设备和通信系统中广泛应用的各种倍频器和分频器。

本书适于从事有关工作的广大工程技术人员、工人和大专院校师生阅读参考。

倍 频 器 与 分 频 器

〔苏〕И.Х.里茨金 著

邓亚桥 译

刘忠民 刘圣民 校

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

天津新华印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本：787×1092 1/32 1982年4月 第一版

印张：13 24/32 页数：220 1982年4月天津第一次印刷

字数：315千字 印数：1——5,900册

统一书号：15045·总2528—无6159

定价：1.40元

目 录

第一篇 总 论

第一章 倍频器与分频器的构成原理和特性	1
§1.1 倍数变频的特点	1
§1.2 倍数变频器的几种电路	4
§1.3 构成倍频器和分频器的两种原理	8
§1.4 分类特征	19
§1.5 采用比较原理的谐波倍频器与分频器	22
§1.6 分频时的相位法则	27
§1.7 谐波倍频器与分频器的特性和参数	30
第二章 研究倍频器与分频器的几种方法	39
§2.1 概述	39
§2.2 分频器的数学理论问题 (周期解)	43
§2.3 采用等效系统分析分频器的方法 (《等效系统法》), 结论评述	50
§2.4 等效系统法, 分频器的原始方程及其变换	54
§2.5 等效系统法, 二次等效系统, 稳定性问题	58
§2.6 倍频器与分频器的数学理论问题 (准周期解)	64
§2.7 用计算机研究倍频器与分频器	68
第三章 倍频器与分频器的非线性元件模型, 频谱分析	71
§3.1 概述	71
§3.2 非线性元件 (非储能元件) 的无惯性模型, 定值作用的 频谱分析	79
§3.3 随机作用下无惯性模型的频谱分析	89
§3.4 具有随机特性的无惯性模型的频谱分析	93

§3.5	非线性电容器(变容管)模型, 变容管的基本概念及其等效电路	100
§3.6	狭义与广义变容管模型	110
§3.7	变容管的频谱响应分析	119
§3.8	隧道管模型, 数字模型	125
§3.9	隧道管的频谱响应分析	131
§3.10	晶体三极管模型	144
§3.11	晶体三极管电流的频谱分析	151

第二篇 有源倍频器与有源分频器

第四章	非自激倍频器与非自激分频器	154
§4.1	电子管倍频器	154
§4.2	晶体三极管倍频器	162
§4.3	理想的最佳倍频器—非周期系统	166
§4.4	理想的最佳倍频器, 选择性四端网络系统	178
§4.5	非自激有源分频器, 混频器的特性	180
§4.6	非自激有源分频器的稳定状态(谐波平衡法的质量分析)	187
§4.7	具有无源混频器与放大器的非自激分频器, 电路的微分方程及其讨论	198
§4.8	具有有源单端混频器和倍频器的非自激分频器(“再生”式分频器)	203
§4.9	具有无源开关混频器而无倍频作用的非自激分频器(开关分频器)	213
§4.10	一些非自激分频器电路	217
§4.11	非自激分频器中分谐波振荡的激励	224
§4.12	具有几个二次混频器的分频器	228
§4.13	倍数变频时扩展频带的某些方法	231
§4.14	隧道管非自激倍频器	237
第五章	自激倍频器与自激分频器	241

§5.1	同步谐波自激振荡器中分频与倍频过程的一般研究	241
§5.2	利用三次特性的同步谐波自激振荡器进行二次分频	248
§5.3	利用同步谐波自激振荡器分频时对非线性元件性能的要求	257
§5.4	一些自激倍频器与自激分频器电路	258
§5.5	无线电脉冲倍频器	264
§5.6	隧道管自激倍频器	269
§5.7	谐波弛张分频器	271

第三篇 无源倍频器与无源分频器

第六章	通论	275
§6.1	无惯性的非线性二端网络一倍频器	275
§6.2	采用非线性电抗元件的倍频器与分频器	287
第七章	变容管倍频器	292
§7.1	概述(电路、状态、研究方法)	292
§7.2	变容管倍频器的方程, 先验数据	293
§7.3	并联与串联电路中倍频的可能性, 开结的倍频状态	299
§7.4	双回路变容管倍频器	301
§7.5	多回路变容管倍频器	310
§7.6	采用阶跃管的变容管倍频器	314
§7.7	变容管倍频器的特性	321
§7.8	变容管倍频器的一些实际电路	322
§7.9	变容管倍频器的设计	325
第八章	无源分频器	328
§8.1	在具有非线性电抗元件的串联回路中的分频	328
§8.2	具有势垒电容的单回路分频器	338
§8.3	储能二极管分频器	350
§8.4	双回路变容管分频器(参量分频器)概述	352

第一篇 总 论

第一章 倍频器与分频器的 构成原理和特性

§ 1.1 倍数变频的特点

本书仅研究最有实用价值的整数倍频与分频问题。倍频器与分频器可定义如下：能将频率为 f_{BX} 的近似正弦输入信号变换成频率为 $f_{BIX} = mf_{BX}$ 或 $f_{BIX} = f_{BX}/n$ 之近似正弦输出信号的变频器，其中， m 和 n 为整数。此时，无论是输入信号的参数（频率、振幅和相位）发生变化，还是系统本身参数（例如振荡系统的谐振频率）发生变化， f_{BIX}/f_{BX} 的值始终保持不变。满足上述条件，则可称为 m 次倍频或 n 次分频。数值 m 和 n 常可相应地称为倍频系数与分频系数。

倍频与分频可以综合为一个概念，统称为倍数变频。倍数变频不同于组合变频，组合变频时，输入变频器的是一系列频率为 $f_{BX}^{(1)}$ 、 $f_{BX}^{(2)}$ …… $f_{BX}^{(K)}$ ①的信号。而输出信号的频率等于上述各输入信号频率的线性组合： $f_{BIX} = |\sum_K P_K f_{BX}^{(K)}|$ ，其中 P_K 为正的或负的整数。组合变频器可简称为混频器。倍数变频器（倍频器与分频器）与组合变频器（混频器）统称之为变频器。在以后的叙述中将广泛采用此术语②。

① 原文为 $f_{BX}^{(r)}$ ——译者注。

② 今后为简便起见，角频率也常简称为频率，但频率和角频率却始终用不同符号表示： f —表示频率； ω —表示角频率。

现在重新回到输出频率与输入频率之比不变这一条件。这个条件决定了倍数变频过程的一个最重要的特点：倍频与分频时，被变换频率的相对漂移几乎不变。就是说，如果输入频率 f_{BX} 变为 $f_{BX} + \Delta f_{BX}$ ，则倍频器的输出频率变为 $mf_{BX} + m\Delta f_{BX}$ ；而分频器的输出频率变为 $(f_{BX}/n) + (\Delta f_{BX}/n)$ ，并且

$$\frac{m\Delta f_{BX}}{mf_{BX}} = \frac{\Delta f_{BX}/n}{f_{BX}/n} = \frac{\Delta f_{BX}}{f_{BX}}$$

换言之，由于输入频率的绝对频移的倍（分）频数与输入频率本身的倍（分）频数相同，因此相对漂移不变。这样，实际上就可以利用倍频器或分频器来获得任何一个频率，使其稳定性等于（严格地说是极接近）某一标准振荡器的频率稳定性。这一点十分重要，因为可以直接获得高稳定性频率的频段在实际中要受到用于稳定物理现象之特性的限制。用晶体振荡器的输出信号作为激励倍频器的输入信号时，可使其稳定性提高，分子振荡器的分频则使稳定性下降。

上面只是着重指出这些论点的近似特性，它决定了下述情况：

1. 倍数变频使实际设备的输出总是伴随着寄生的角度与振幅调制，也就是说，输入电压 $u_{BX} = E_{BX} \cos \omega_{BX} t$ 将发生变化。

在倍频器中

$$u_{BbIX} = E_{BbIX}(t) \cos[m\omega_{BX}t + \psi(t)], \quad (1.1)$$

在分频器中

$$u_{BbIX} = E_{BbIX}(t) \cos[(\omega_{BX}/n)t + \psi(t)] \quad (1.2)$$

角度 ψ 和振幅 E_{BbIX} 的变化是时间的随机函数（随机过程）。在设计正确，装配无误的倍频器与分频器中，此过程将为窄带过程。不是与固定的振幅和相位相适应的离散频谱

ω_{BX}/n 或 $m\omega_{BX}$ ，而一般说是与(1·1)和(1·2)式随机过程的能谱发生关系。这些能谱都各有不同，但其主要特点是它们都具有一定的能谱宽度。

在某些情况下，输出 ω_{BLX} 的频谱线被“展宽”，而在另外情况下，则是分布在某些“台阶”上的 δ 函数，该函数可用输出电压 $u_{BLX}(t)$ 能谱分量 ω_{BLX} 来表征。

与理想情况相比，频谱发生上述变化可能有两方面的原因。首先，对于纯正弦过程的 $u_{BX}(t)$ ，输出电压 $u_{BLX}(t)$ 的“离散”频谱可能由倍数变频器本身固有的随机机理所造成。例如：倍频器与分频器中有源与无源器件的噪声，以及元件参数的变化等等。此时，重要的是将自然因素（如热噪声）与原则上可以避免的技术因素（如电源电压不稳定、振动等）加以区别。

其次， $u_{BX}(t)$ 本身往往不能看作单一的振荡过程，在这种模型中其振幅和相位都是时间的随机函数，这样就产生了窄带随机过程的分频与倍频问题。这种过程的“频率”可理解为不同的数值。例如，可理解为对称能谱的中心频率，或在具有“台阶”的能谱中 δ 线的横坐标等。

上述有关频率概念的补充应推广到输出过程。由于(1·1)和(1·2)式中存在调制，可以使其中心频率 $\bar{\omega}_{BLX}$ 并不精确地等于 $m\bar{\omega}_{BX}$ 或 $\bar{\omega}_{BX}/n$ 。此处 $\bar{\omega}_{BX}$ 为输入中心频率。最后应注意，在多级倍数变频器中，振幅调制总要变为相位调制，因此整个变频情况就变得十分复杂了。

但是必须指出，只有对频率和相位的稳定性要求很高时， E_{BLX} 和 ψ 的随机调制才具有重要意义。

一般来说，在变频过程中提高对纯正弦程度的要求，会使倍频器与分频器的所谓“相位稳定性”提高，这是倍数变频技

术的重要课题之一。

2. 输入频率发生 Δf_{BX} 的变化并不总是导致 $f_{B\Delta BX}$ 的成倍变化。上述结论往往只有在某些特定情况下，其中包括 f_{BX} 缓慢变化的情况下才是正确的。当具备相应的条件时，可以利用倍数变频器对输入频率的绝对变化值进行倍频或分频。例如，在调频技术中，常常利用倍频器来增加频移。

最后以下面例子来说明倍数变频与组合变频的区别。假设要获得200千赫的稳定频率，可用下述几种方案：（1）一个100千赫的晶体振荡器用二倍频器倍频；（2）一个1兆赫的晶体振荡器用五频器分频；（3）两个100千赫的晶体振荡器用混频器相加。只有在前两种情况下，200千赫频率的漂移才能与晶体振荡器频率的漂移相同。对于第三种方案，输出频率的漂移将取决于两个振荡器漂移的总和，这种漂移与其中任一振荡器频率的漂移之间通常无固定的关系。

§ 1.2 倍数变频器的几种电路

1. 具有谐振放大器的倍频器

现在来讨论丙类非线性谐振放大器。假定输出电流仅与输入电压有关，而该交流分量与倍频器的输入电压相等，并且是频率为 ω_{BX} 的正弦振荡^①，由于放大器跨导的非线性，阳极电流的波形将与输入电压的正弦波形有很大差别。在阳极电流的频谱中将包含 ω_{BX} 的谐波频率，放大器谐振系统能分离出其中某次谐波，输出频率近似为 $m\omega_{BX}$ 的正弦电压，此处 $m > 1$ ，其

^① 译注：Колебание一词通常译为“振荡”，本书中根据不同地点有时也译为“激励”或“信号”。

数值与谐振电路的调谐情况有关（例如集电极中某一回路的频率为 ω_0 ）。

2. 倍数变频器——同步自激振荡器

实际应用的许多倍频器和分频器都是谐波自激振荡器（多半为LC型振荡器）。该振荡器与输入正弦振荡的谐波或分谐波同步。与谐波同步时，可获得相当于 $m\omega_{BX}$ 的频率，与分谐波同步时，可获得 ω_{BX}/n 的频率。

假定在自激振荡器中，由外部以某种方式引入一频率为 ω_{BX} 的正弦电压。在作分频时，自由振荡的频率允许选为与 ω_{BX}/n 接近的频率。这里 n 为所需的分频系数。试验表明，如果 ω_0 非常接近于 ω_{BX}/n ，而且激励①振幅选在一定范围内，则自激振荡器的振荡频率恰好等于 ω_{BX}/n 。如果固定 ω_{BX} 而改变 ω_0 ，例如重新调谐振荡回路，使产生一小的“失谐” $|\omega_0 - (\omega_{BX}/n)|$ ，则振荡器的频率将始终保持不变，即保持 $\omega_{BX}/n = \text{常数}$ 。反之，如果使频率 ω_0 保持不变而改变 ω_{BX} ，则输出频率将随着 ω_{BX} 呈线性变化，并且总是等于 ω_{BX}/n 。不过，无论对上述哪种情况，振荡器的相位和振幅都将发生变化。倍频时的情况与分频类似，只是 ω_0 应选择近似于 $m\omega_{BX}$ 。

振荡器振荡频率的改变，可解释为由于振荡回路中受外部作用而引入一个阻抗的缘故。

3. 锁相环分频器

图1·1所示为这种系统之一的结构图。当无（频率为 ω_{BX} ）输入信号时，自激振荡器振荡于频率 $\omega_0 \approx \omega_{BX}/n$ ，比较装置将振荡

① 译注：Воздействие原意为“作用”、“影响”，在本书中常用来指“激励信号”、“外加电压或功率”等等。故本书中大部分译为“激励”或“作用”。

频率 ω_{BX} 与 ω_0 进行比较，并将结果化为电信号加至控制部分。控制部分可以控制振荡器的振荡频率 ω_0 ，由于有比较装置，当频率 ω_0 与 ω_{BX}/n 完全相等时，其输出将不会使 ω_0 因控制装置的作用而变化。如果 ω_0 偏离 ω_{BX}/n ，则控制装置便会立即起作用，使 ω_0 与 ω_{BX}/n 重新趋于相等。

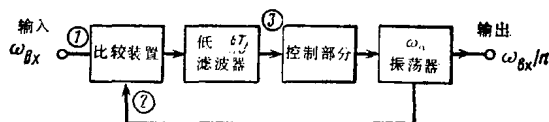


图 1-1

控制部分有各种类型，如电抗管控制器等。比较装置亦有多种方式，其中之一是先进行 n 倍频，然后通过专门的变频器产生差频 $\omega_{BX} - n\omega_0$ 。以后将看到，差频或某种组合频率的形成对全过程具有极重要的意义。比较装置产生的其它频谱成分可通过低频滤波器滤除。

只要 $\omega_{BX} - n\omega_0 \neq 0$ 或者 $\omega_0 \neq \omega_{BX}/n$ ，比较装置就会有使控制部分动作的交流成份信号输出。而当 $\omega_0 = \omega_{BX}/n$ 时，组合频率变为零，滤波器输出的则是直流成分，此时振荡器的频率调整过程将停止。

4. 再生分频器

这种广泛应用的分频器包括两个变频部份（一个混频器和一个倍频器）和一个调谐回路频率 $\omega_0 \approx \omega_{BX}/n$ 的谐振放大器（图1-2）。

使倍频器开路（3和4两点间的虚线），假设由于波动或

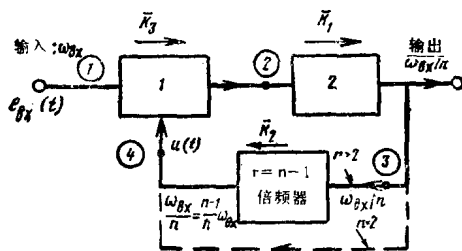


图 1.2

某种原因放大器回路中产生了各种频率的小振荡，这些小振荡在混频器中与输入频率 ω_{BX} 相互作用后以 $|p\omega_{BX} - q\omega|$ 的形式输入到放大器电路，其中 p 和 q 取决于混频器的特性①。在稳定状态下，只有在反馈“行程”不发生变化的那个频率（更准确地说那些频率），才能在闭合电路中循环振荡下去。因此，频率平衡的条件为：

$$|p\omega_{BX} - q\omega| = \omega \quad (1.3)$$

如果放大器的增益足够大，则只有当电路中小振荡成分满足(1.3)式条件时，组合频率的振荡才能保持下去。因此上述电路中产生的振荡频率 ω 与输入频率的比值为有理分数。当 $p = q = 1$ 时， $\omega = \omega_{BX}/2$ ， $n = 2$ ②。改变频率 ω_0 和 ω_{BX} 时，系统的反应与同步振荡器（见前述）相同。

放大器中回路的作用是滤除远离 $\omega_{BX}/2$ （其中包括和频 $\omega_{BX} + \omega$ ）频谱的成分。只有小失谐时，放大器的增益才能很大，因此，电路中只能采用适合于调谐频率 $\omega_0 \approx \omega_{BX}/n$ 时的分

① 混频时组合频率表达式中各系数（假定为正数）的和称为组合频率的次数，此处，次数等于 $p + q$ 。

② 当 $n > 2$ 时，一般要在电路中加入 $n - 1$ 倍频器，当 $p = q = 1$ 时，可将频率分为 n 份，见§4.8。

频系数 n 。

§ 1·3 构成倍频器和分频器的两种原理

1. 两种原理的一般特点

各种倍频器和分频器电路，基本上可分为两类，与其相对应则有两种不同的构成倍数变频器的原理。

获得输入振荡的谐波或分谐波可以看作是对该振荡有目的引导畸变过程的结果，此过程有两种形式。对于第一种形式，要在倍数变频器中预先接入固有频率接近于输出频率（ $\omega_0 \approx m\omega_{BX}$ 或 $\omega_0 \approx \omega_{BX}/n$ ）的某种振荡系统。这样，畸变振荡就象预先准备好的一样，只是由于振荡频率近似于而不是完全等于所需的频率，因而畸变振荡也是近似的。这类装置的作用实质是将畸变振荡与频率完全等于分频器频率的振荡相比较，然后进行调整，使畸变振荡频率也达到所要求的数值。这种倍数变频器就叫做比较原理的倍频器或分频器。这类装置的特点是有反馈存在，通过反馈不断地将两种振荡进行比较。

第二种形式是以输入振荡的“直接”畸变为基础的，通过“直接”畸变使输入频率产生许多谐波与分谐波。这种畸变不改变任何振荡系统的特性（如调谐频率）。这类倍数变频器称为畸变原理的倍数变频器。

采用比较原理的倍数变频器有：谐波或分谐波自激振荡器；频率自动微调分频器以及“再生”分频器。采用畸变原理的倍数变频器有：阳极回路电子管倍频器；二极管倍频器；触发器分频器与变容二极管分频器。

下面分别研究这两种类型的电路。

2. 畸变原理的倍频器与分频器

用具有 $y = f(x)$ 特性的某种非线性元件来改变正弦波是构成这种变频器的熟知的典型方式。如果 $x = E_{BX} \sin \omega_{BX} t$ (ω_{BX} 为输入频率)，则作为时间函数的 y 值的频谱 $y(t) = f(E_{BX} \sin \omega_{BX} t)$ 中就包含有频率 ω_{BX} 的谐波。上述各谐波组成了 $y(t)$ 的频谱，其振幅和相位取决于非线性元件的特性。在任何非线性元件中，至少也会有一个输入频率的谐波产生^①。

这种倍频方法不需要任何比较输入与输出振荡的存储装置，因而具有广泛用途。

假如按照既定的工作条件，倍频器应该输出正弦波，而 $y(t)$ 频谱中包含有无用谐波，则需要进行滤波以取出有用成分。这种倍频器的方框图见图1.3^②。

须知在类似情况下，输出效率并不总是取决于 $x(t)$ 振荡，而非线性元件输出电抗对非线性变频结果的影响也常常是不可

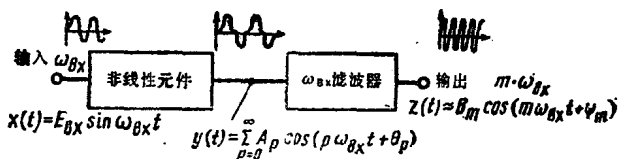


图 1.3

① “换向倍频器”是一种特殊类型的倍频器。在这种倍频器中，首先通过延迟线系统使 ω_{BX} 频率的脉冲序列转化为 $m\omega_{BX}$ 频率的脉冲序列，然后进行滤波。因此需滤波的最小振荡频率就不是 ω_{BX} ，而是 $m\omega_{BX}$ 了（见参考文献[273]）。就一定意义来说，这种倍频器近似于非谐波倍频器（类似于延迟线与逻辑元件分频器）。

② 如果非线性元件输出端只有所需谐波的输出，则可构成所谓“理想”倍频器。这种倍频器具有许多优良特性，在以后（§4.3）加以研究。

忽略的。假如图1·3中,非线性元件是集电极电路接有槽路的晶体三极管,则集电极电流 $i_k(t) = y(t)$ 将不仅取决于电压 $E_{BX}\sin\omega_{BX}t$,而且也与集电极电压有关。这种特性的元件属于二端网络非线性元件。此时,正如下面将看到的,输入与输出振荡将同时加在非线性变频器上,这里假定图1·3中的非线性元件是单向的。

属于这种类型的倍频器如:电子管(或晶体管)及振荡回路倍频器;速调管与空腔谐振器电子束倍频器(非线性取决于聚束机理);超高频波导铁氧体倍频器等等。

如果非线性变频器的输出仅与输入振荡 $E_{BX}\sin\omega_{BX}t$ 有关,则按照图1·3实现分频是不可能的。因为如果将 $f(E_{BX}\sin\omega_{BX}t)$ 按付里叶级数展开,则只能得到谐波,而无分谐波。

这个问题将放到第六章去讨论。现在来看下述情况:假定有一周期为 T_{BX} 的正弦输入信号使它通过畸变后,在某一情况下可获得周期减小若干整数倍的成分(倍频),而在另一情况下可获得周期增加若干整数倍的成分(分频)。就某种意义上说,对于这两种畸变所需的特性是极其不同的。

实际上,对第一种情况来说,可使每一正弦周期相当随意地畸变,在第二种情况下,即分频时,不同的周期则需按不同的方式畸变,或者使一个周期畸变,其它周期不畸变。只有这样,才能加大输入振荡的周期。当然,图1·3系统不能实现下述变换:为了使不同的周期 x 加入不同的畸变,应将其加以区分,而图1·3这种变频器不能实现这种功能。

由上所述,可以得出两个结论:(1)原则上讲,分频过程比倍频过程更复杂;(2)畸变分频器的结构中应加入记忆装置,用以“记忆”输入周期数,因而可以分频。

图1·4所示为上述分频器的方框图。畸变装置通过可以记