

电阻性混频器的 理论与设计

王惠功 尹书明 编译



人民邮电出版社

73.766

121

电阻性混频器的 理论与设计

王惠功 尹书明 编译



人民邮电出版社

8610397

内 容 提 要

本书主要是根据Adel A.M.Saleh所写的《Theory of Resistive Mixer》编译的。它系统地讨论了电阻性混频器的理论和应用。为使读者对原著更方便,书中增加了编译者的体会和设计实例。全书共分五章,即绪论、混频器电路的类型与分析、最佳电阻波形和最佳插入网络、指数二极管混频器、微波二极管混频器设计。

本书物理概念和数学分析并重,书中还列出了必要的附录作为正文的补充。可供从事无线电技术工作的工程技术人员、研究人员,以及有关大专院校的教師、研究生、高年级学生参考。

电阻性混频器的理论与设计

王惠功 尹书明 编译

责任编辑:梁素梅

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

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 1985年9月第 一 版

印张: 9 8/32 页数: 148 1985年9月河北第一次印刷

字数: 210 千字 印数1—4,000册

统一书号: 15045·总3019-无6327

定价: 2.00 元

前言

这是一本系统分析讨论电阻性混频器理论与应用的书。其主要部分是根据Adel A. M. Saleh所写的专著编译，同时增加了编译者的体会和设计实例，从而使得对原著的理解更为方便。

全书共分五章，即绪论、混频器电路的类型与分析、最佳电阻波形和最佳插入网络、指数二极管混频器、微波二极管混频器设计。在第一章中，简要讨论了混频器的作用、工作原理、混频二极管的一些特性，并定义了本书使用的频率、电流、电压的表示方法。第二章探讨线性周期时变电阻混频器电路的分类与分析方法。导出了输入与输出电压电流关系的矩阵方程。在第三章中，着重讨论了与电阻性混频器性能关系密切的三个基本问题，即最佳电阻（或电导）波形、最佳插入网络、最佳混频器。第四章讨论并比较了使用理想指数二极管的各类混频器的性能，对每类混频器的分析都包括两部分：大信号分析、小信号分析，并得到了一些简单的近似计算公式。同时也涉及到了一些电阻（或电导）波形。此外，还介绍了计算电阻性混频器特性的 $i = kv^r$ 法。第五章主要讨论电阻性混频器理论的实际应用。以微波混频器的设计为例，简要介绍了电阻性混频器理论在实际应用方面出现的新技术、新电路、新方法。

本书由甘本被同志审阅。他为审阅本书付出了辛勤的劳动。在编写过程中得到北京邮电学院叶培大教授的热情支持与具体指导。胡正铭副教授和陶尚平副教授也曾给予热情帮助，在此表示衷心的感谢。

由于编译者水平有限，书中难免有错误或不妥之处，切望读者指正。

编译者

目 录

第一章 绪 论	(1)
第二章 混频器电路的类型与分析	(4)
§ 2.1 线性混频器的表示方法	(4)
2.1.1 频率表示方法	(4)
2.1.2 电压、电流表示方法	(5)
§ 2.2 Z 及 Y 混频器	(6)
2.2.1 基本电路和定义	(6)
2.2.2 具有空闲电路的 Z 、 Y 混频器	(11)
§ 2.3 奇偶阶频率的分离	(16)
2.3.1 单端和平衡混频器电路	(16)
2.3.2 四种基本混频器电路	(19)
§ 2.4 H 和 G 混频器	(21)
2.4.1 时域分析	(21)
2.4.2 频域分析	(25)
§ 2.5 N 元分割原理	(28)
2.5.1 N 元分割的基本概念	(28)
2.5.2 H_N 和 G_N 混频器	(31)
§ 2.6 小结	(37)
第三章 最佳电阻波形和最佳插入网络	(39)
§ 3.1 引言	(39)
§ 3.2 最佳电阻波形	(41)
3.2.1 Z 和 Y 混频器的最佳电阻 (电导) 波形	(41)

3.2.2	H 和 G 混频器的最佳电阻波形	(50)
3.2.3	H_N 和 G_N 混频器的最佳电阻波形	(57)
§ 3.3	混频器的最佳插入网络	(63)
3.3.1	有关最佳插入网络的一些定理	(64)
3.3.2	正弦电阻或电导波形	(68)
3.3.3	方波电阻或电导波形	(77)
3.3.4	矩形脉冲电阻和电导波形	(85)
§ 3.4	最佳混频器	(85)
3.4.1	变频损耗的基本极限	(86)
3.4.2	结电容 C_j 和串联电阻 R_s 的影响	(88)
§ 3.5	小结	(90)
附录		(93)
附3.1	广义矩阵表示	(93)
附3.2	二端口网络的无源性	(96)
附3.3	稳定性	(98)
附3.4	变频损耗	(99)
附3.5	源阻抗变化的灵敏度	(103)
第四章	指数二极管混频器	(108)
§ 4.1	引言	(108)
§ 4.2	具有镜像频率终端的混频器	(109)
4.2.1	广义矩阵表示	(110)
4.2.2	以实矩阵表示的混频器	(115)
§ 4.3	单管混频器	(121)
4.3.1	单管 Y 混频器	(121)
4.3.2	单管 Z 混频器	(137)
4.3.3	单管 G 混频器	(144)
4.3.4	单管 H 混频器	(152)

4.3.5	单管 Y 、 Z 、 G 、 H 混频器的比较	(159)
4.3.6	二次谐波开路的指数二极管 Y 混频器 ...	(168)
§ 4.4	多管混频器	(174)
4.4.1	指数二极管环形混频器的对偶性	(175)
4.4.2	用正弦电压激励的情况	(177)
4.4.3	用正弦电流激励的情况	(183)
§ 4.5	寄生参量对混频器性能的影响	(188)
§ 4.6	关于电压、电流关系以 $i = kv^r$ 表示的单管 Y 混频器.....	(201)
附录	本章渐近公式的推导.....	(212)
附4.1	积分 1	(212)
附4.2	积分 2	(213)
附4.3	积分 3	(213)
附4.4	积分 4	(214)
附4.5	积分 5	(214)
附4.6	积分 6	(214)
附4.7	积分 7	(215)
附4.8	积分 8	(216)
附4.9	积分 9	(216)
附4.10	积分10	(217)
附4.11	积分11	(218)
第五章	微波二极管混频器设计.....	(219)
§ 5.1	引言	(219)
§ 5.2	混频器的噪声系数	(222)
5.2.1	混频二极管的噪声比	(222)
5.2.2	混频器的噪声比与噪声系数	(225)
5.2.3	整机噪声系数	(228)

§ 5.3 设计的基本考虑	(231)
5.3.1 混频二极管的选择	(232)
5.3.2 功率混合电路	(232)
5.3.3 微波二极管管座电路	(234)
5.3.4 阻抗匹配电路	(235)
5.3.5 电路中的其它问题	(236)
§ 5.4 设计的进一步考虑	(236)
5.4.1 使用几个混频二极管为好	(237)
5.4.2 是否采用低噪声混频电路	(238)
5.4.3 用什么样的传输线构成混频器	(239)
5.4.4 分谐波激励技术	(240)
§ 5.5 宽带波导混频器设计举例	(241)
5.5.1 方案的选择	(241)
5.5.2 频率特性的简要分析	(242)
5.5.3 交叉棒混频器的失配损耗和结损耗的计 算	(249)
5.5.4 交叉棒混频器的构成及性能	(251)
§ 5.6 两管分谐波激励混合集成混频器举例	(256)
5.6.1 两管分谐波激励混合集成混频器的构成 及其特点	(256)
5.6.2 分谐波激励原理	(258)
5.6.3 电路尺寸缩放技术的应用	(262)
5.6.4 电路说明及性能	(263)
§ 5.7 平面电路构成的混频器举例	(266)
5.7.1 对镜像回收技术的考虑	(268)
5.7.2 平面电路装入波导构成的混频器的原理 说明	(272)

5.7.3 平面电路装入波导构成的混频器的性能	(273)
§ 5.8 微带混频器的设计举例	(274)
5.8.1 指标要求	(274)
5.8.2 设计程序与步骤	(275)
5.8.3 具体计算	(275)
主要参考资料	(286)

第一章 绪 论

频率变换器广泛地应用在通信接收机、发射机、雷达、射电天文、控制系统及其它很多方面。频率变换器是由本地振荡器（也称泵源）和一个用以耦合本地振荡器的输入和信号输入、输出的且包含一个或多个非线性有源器件的网络所组成。通常把这个网络称为混频器。完成混频的过程中，要求尽可能使变换（也称变频）损耗、噪声及非线性畸变小。在超外差接收机中，以及在其它许多应用中，输出的信号称作中频（以 f_{if} 或 f_o 表示），它通常是信号和本振频率之差，而在很多应用中，它比混频器中所包含的其它频率都低。

混频器中所使用的非线性器件可以是电阻或电抗，而通常是由二者所组成。从习惯上讲，如果基本混频过程主要是由非线性电阻所完成，当然可以包含少量的寄生参量电抗的作用，则这种网络叫混频器。如果基本混频过程主要是由非线性电抗完成的，当然可以包含少量的寄生参量电阻的作用，则这种网络称为“参量”频率变换器。

大家知道，参量上变频器可以产生功率增益，其大小就等于输出与输入频率之比，而且它是无条件稳定的，因此，得到了广泛的应用。另一方面，虽然参量下变频器也可以产生增益，但由于它存在潜在不稳定，因而很少在实际中采用。其它一些具有变频增益的混频器的例子是由负阻器件如隧道二极管构成的。然而，它们存在如何稳定工作这个突出问题。因此，下变频器都采用非线性电阻来完成变频这一任务。本书只讨论由

8610397

非线性正电阻构成的混频器。将所得结果直接或稍作修改就可以用于上变频器，其中的某些结果也可以应用到负阻混频器去。

本书只讨论带有理想选择性滤波器的纯电阻性混频器，略去电阻性器件中的寄生电抗的影响。这样做一方面是理论工作的需要，另一方面，即使把所论述的理论应用到微波波段，寄生参量电抗的影响也是很小的。其理由如下：

1. 从目前半导体工艺水平看，可以生产出像肖特基势垒二极管这样的混频二极管，把它使用在微波波段仍显示纯电阻性特性。

2. 对混频器性能的影响起着最主要作用的，不是混频器所用的二极管及其寄生参量电抗，而是目前已有的混频器的插入网络，连同激励它们的方式。

3. 尽管处理纯电阻性二极管所构成的混频器很复杂且还有不少问题尚待解决，但较之处理含有寄生参量的二极管所构成的混频器要简单得多。这有助于对怎样构成性能良好的混频器、以及对确定混频器性能的基本极限更深入的了解。

第二章讨论各种线性周期时变电阻混频器的分析方法。给出了混频器的分类系统，这种分类系统的分类依据是不需要的带外频率的端接状态，而各种混频器的名称就采用用以分析网络的 Z 矩阵、 Y 矩阵、 H 矩阵和 G 矩阵的名称，即相应的有 Z 混频器、 Y 混频器、 H 混频器和 G 混频器。对各种混频器的分析只到导出取决于电阻波形的输入和输出电压电流的矩阵方程为止。

第三章讨论涉及电阻性混频器性能的基本极限的三个基本问题。这些问题包括在第二章介绍的各种混频器插入网络的最佳电阻波形、以及找各种正电阻波形的最佳插入网络。所选定

的最佳参量是混频器的变频损耗。第三章的课题可看作是对当今最优混频器的探索。

在第二和第三章中，假定电阻波形是完全任意的，而且与插入网络无关。然而，实际上并非如此，这是因为，电阻波形是由激励一个处于插入网络中的非线性器件而得到的，因而，它取决于使用的器件、激励方式以及插入网络。

在第四章中，分析、比较使用理想指数二极管的各种混频器的特性。每种混频器的分析都包含两部分：大信号分析和小信号分析。其中大信号分析包括被激励的电阻波形、泵源功率、对泵源所提供的电阻，以及直流偏置条件的计算。小信号分析包括镜频不同端接时，对变频损耗和源电阻、输出电阻最佳值的分析。在对每种情况的分析中，都采用渐近近似的方法，以得到一些简单的公式，这些公式在强激励时是精确的。

第五章简要介绍电阻性混频器理论在微波混频器中的一些应用。以例子的形式介绍了一些混频技术与较为新颖的微波混频器的结构。

第二章 混频器电路的类型与分析

本章讨论的问题之一是混频器的分类。主要的依据是 N 元分割，由此可以得到各种不同类型的混频器。

本章讨论的问题之二是混频器的分析方法。包括时域分析和频域分析。每种混频器的分析都是在给定电阻波形，直到导出输出、输入频率的电压、电流关系的矩阵方程为止。

§ 2.1 线性混频器的表示方法

2.1.1 频率表示方法

当频率为 ω_s 的信号与频率为 ω_p 的本振信号加在非线性电阻上以后，除了产生通常所称的中频 ω_0 （即 ω_{if} ）外，还要产生与信号频率 ω_s 有关的谐波边带 ω_n ，因此有

$$\omega_n = n\omega_p + \omega_0 \quad (n = -\infty, \dots, +\infty)$$

其中 $\omega_0 = \omega_s - \omega_p$

上式就是我们要采用的频率表示方法的关系式。这是因为，在很多混频器中，特别是在微波混频器中， $\omega_0 \ll \omega_p$ 的关系总是满足的，因此有

$$|\omega_n| \simeq \omega_n \simeq n\omega_p \quad (n = 0, 1, \dots, \infty)$$

这里 $\omega_n < 0$ （ $n = +1, \dots, +\infty$ ）。所以，只要知道了某一频率的下标，则具有同样下标的频率的大小可视为相同。

在上述的表示法中, 信号频率 $\omega_s = \omega_{+1}$ 及镜像频率 $\omega_i = -\omega_{-1}$ 是奇阶频率, 而中频 $\omega_{if} = \omega_0$ 、和频 $\omega_u = \omega_{+2}$ 及其镜频 $\omega_u = -\omega_{-2}$ 为偶阶频率。为了对这种表示方法了解得更具体一些, 其各频率成分间的相对关系示于图2.1。实线位置的频率为所采用系统中的各频率成分, 它们均以中频 $\omega_{if} = \omega_0$ 为中心沿频率轴依次对称排列。虚线位置的频率为所采用系统中的各频率成分以原点为参考面的像”。而本振频率及其谐波 $n\omega$, 则只在频率轴上标明相对位置, 它们是以原点为对称的无限序列。

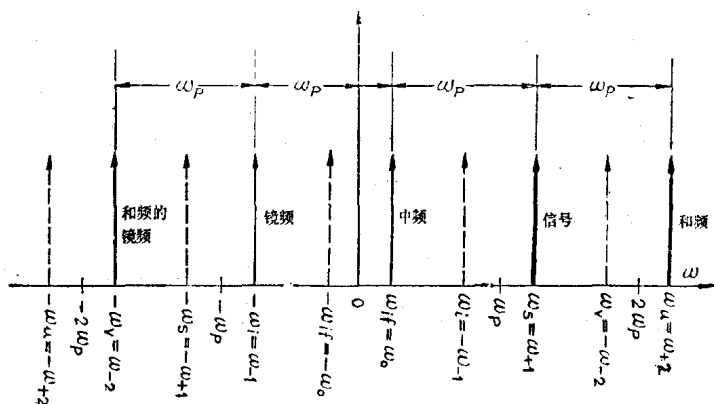


图 2.1 频率表示方法

2.1.2 电压、电流表示方法

在以频率为 ω_p 的本振激励的线性混频器中, 其混频后的总电压和电流分别表示为

$$v(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} V_n e^{j(n\omega_p + \omega_s)t} \quad (2.1)$$

$$i(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n e^{j(n\omega_p + \omega_s)t} \quad (2.2)$$

这里 $V(t)$ 和 $i(t)$ 均为复数, 现取 $|V_n|$ 和 $|I_n|$ 为在频率 $\omega_n = n\omega_0 + \omega_0$ 时它们的均方根值。在图2.1中仅用实线表示, 但它们包含了信号波形中的全部功率。

式中出现了负频率的电压、电流(V_{-n} , I_{-n} ; $n = +1, \dots, +\infty$)。它们实际上是相应的正频率的电压、电流的共轭复数。例如, 镜频的惯用表示是 $V_i e^{j\omega_i t}$ 及 $I_i e^{j\omega_i t}$ ($\omega_i > 0$), 在我们的表示法中却有 $V_{-1} e^{j\omega_{-1} t}$ 及 $I_{-1} e^{j\omega_{-1} t}$ ($\omega_{-1} = -\omega_i < 0$), 因此, 它们之间有下列关系:

$$V_{-1} = V_i^* \quad (2.3)$$

$$I_{-1} = I_i^* \quad (2.4)$$

即 V_{-1} , I_{-1} 与 V_i , I_i 是共轭复数关系。此外, 若镜频的阻抗为 Z_i , 那么, 在我们的表示法中有

$$Z_{-1} = Z_i^* \quad (2.5)$$

以此类推, 对于所有的负频率项, 电压、电流、阻抗都有类似于式(2.3)、(2.4)及(2.5)的关系。

§ 2.2 Z及Y混频器

2.2.1 基本电路和定义

所谓Z混频器是这样一种混频器电路, 它除了信号频率 ω_{+1} 及中频 ω_0 以外, 所有其它频率成分都被开路, 如图2.2a所示。图中 V_{+1} , I_{+1} 及 V_0 , I_0 分别为信号和中频的电压、电流, 两个串联谐振回路分别谐振于信号频率 ω_{+1} 和中频频率 ω_0 , 而对其它频率成分开路。 $r(t)$ 是随本振频率 ω_p 而线性、周期变化的时变电阻。

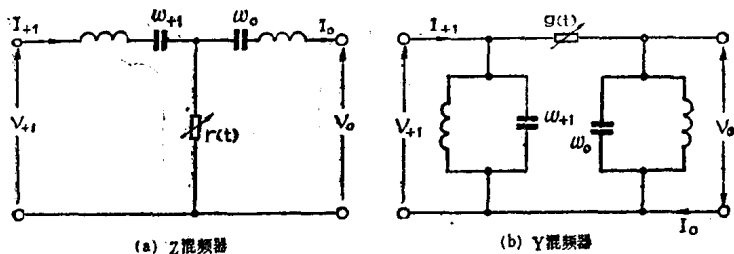


图 2.2 Z、Y混频器

所谓Y混频器，是这样一种混频器电路，它除了信号频率 ω_{+1} 及中频频率 ω_o 以外，所有其它频率成分均被短路，如图2.2b所示。图中 V_{+1} 、 I_{+1} 和 V_o 、 I_o 的意义与Z混频器中的相同。两个并联谐振回路分别谐振于信号频率 ω_{+1} 和中频频率 ω_o ，而对其它频率成分短路。图中的 $g(t)$ 是随本振频率 ω ，而线性、周期变化的时变电导。

下面进行分析。目的是得出它们的方程，而暂不讨论其性能。而且在求方程时，只详细推求其中一种混频器（比如只求出Z混频器）的方程；再由对偶性就可以推出另一种混频器（比如Y混频器）方程。

下面分析Z混频器。由图2.2，根据定义有

$$\left. \begin{aligned} I_n &= 0 & \text{当 } n = -1, \pm 2, \dots, \pm \infty \\ I_n &\neq 0 & \text{当 } n = 0, +1 \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

也即仅有两个正弦电流 $I_{+1}e^{j\omega_{+1}t}$ 和 $I_o e^{j\omega_o t}$ 流过 $r(t)$ 。而表示 V_n （ $n = +\infty, \dots, -\infty$ ）与 I_{+1} 、 I_o 的关系的唯一方法是用 $r(t)$ 的Z矩阵表达式。为此，先从一般情况入手，求得 V_n 与 I_n 的关系，然后根据(2.6)式的条件求得Z混频器的方程。

如图2.3所示，令被本振激励的电阻波形的傅氏级数形式为

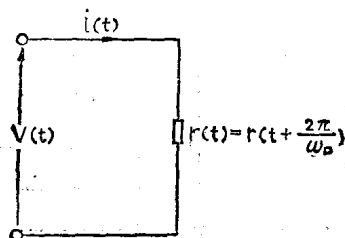


图 2.3 混频器的时域表示

$$r(t) = r_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} r_n \cos(n\omega_0 t + \theta_n) \quad (2.7)$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} r_n e^{jn\omega_0 t} \quad (2.8)$$

这里 θ_n 为相应于 r_n 的初相角。 r_n 为时变电阻 $r(t)$ 的谐波系数。

$$r_n = r_{-n}^* = |r_n| e^{j\theta_n} \quad (2.9)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} r(t) e^{-jn\omega_0 t} d\omega_0 t \quad (2.10)$$

若混频后的总电压、电流为

$$V(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} V_n e^{j(n\omega_0 t + \omega_0 t)} \quad (2.11)$$

$$i(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n e^{j(n\omega_0 t + \omega_0 t)} \quad (2.12)$$

则时域方程为

$$V(t) = r(t) i(t) \quad (2.13 a)$$

或

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} V_n e^{j(n\omega_0 + \omega_0)t}$$