

## 双平衡混频器

混频器是典型的频率变换器件，它在微波通讯、雷达、遥感遥控、电子侦察与对抗、微波测量仪器等领域应用广泛。一方面，将低频基带信号调制到微波频段，以便于信息和能量的传输；另一方面，将含有基带信息的微波信号变换成中、低频信号，以便进行信息或信号处理。

从电路形式看，混频器有单管混频器、单平衡混频器、双平衡混频器以及三平衡混频器等。其中，平衡混频器由于本振和射频之间有良好的隔离，并能抑制本振的调频噪声，对各种混频杂波也有所抑制，应用最为广泛。

### 混频器术语定义

正确理解下列术语，对于选用混频器及发挥混频器最佳性能肯定是有指导意义的。

#### 1 变频损耗和噪声系数

变损和噪声系数是混频器的两个重要参数，它们是密切相关的。变损就是变换效率，对一个混频器的主要要求就是在最小的射频输入功率下，获得最大的中频输出功率，而产生的噪声为最小。

混频器变损等于单边带中频输出功率与射频输入功率之比，用 dB 表示。功率的测试是在规定的本振电平和 50Ω 系统上进行的，当本振电平与规定电平有出入时，变损将会有变化。

通常只给出一个边带时的变损值，如果两个边带上都用上，变损就比单边带时小 3dB。

混频器的噪声系数一般规定在某个中频上进行测试，测试系统中还包括混频器后面的一个前置中放，该中放在测试中会贡献噪声能量，混频二极管也要在噪声系数中贡献少量的噪声系数。

噪声系数的 dB 数与混频器的变损 (Lc)、前置中放噪声因子 (F<sub>IF</sub>) 以及混频二极管的噪声温度比 (T) 有如下关系

$$N_F(\text{dB}) = L_c(\text{dB}) + 10\lg(F_{IF} + T - 1) \quad (1)$$

式中 F<sub>IF</sub> 为数值比。

高质量的肖特基二极管，T 可低到 0.85，但典型值为 1。

因此

$$N_F(\text{dB}) = L_c(\text{dB}) + N_{F_{IF}}(\text{dB}) \quad (2)$$

公式 (2) 表示混频器的整机噪声系数等于混频器的变损加上前置中放的噪声系数。

当需要单独估算混频器的噪声系数时 (不包括前中的噪声系数)，习惯上将混频器的变损加 0.5dB 即表示混频器的噪声系数。

#### 2 变频压缩

变频压缩是混频器线性应用状态下最大射频输入电平的量度，在正常情况下，射频输入电平远低于本振激励电平，此时中频输出随射频输入线性地增加，但当射频输入电平增加到某个电平时，混频器开始饱和，输入输出之间的线性关系开始被破坏。

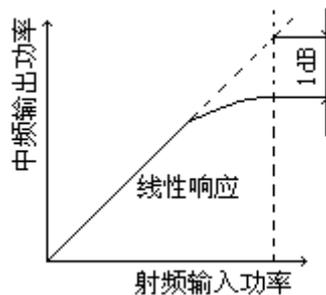


图 1 1dB 压缩点

变频压缩是用中频输出对射频输入偏离线性某一压缩量来说明的，通常规定为 1dB，称 1dB 压缩点，如图 1 所示。混频器工作时输入电平比 1dB 压缩点相应的输入电平越小，混频器的失真产物越少。应使混频器的输入电平小于 1dB 压缩点相应的输入电平。

1dB 压缩点确定了混频器动态范围的上限值，是很有用的一个参数，1dB 压缩点是本振电平的函数，1dB 压缩点近似地随本振功率的 dB 数增加而增加。

#### 3 隔离度 (泄漏)

隔离度是混频器电路平衡度的一个量度，当电路很平衡时，各端口间的隔离很好，信号相互泄漏是

很少的。对很多应用，本振功率泄漏到射频端的指标是重要的，因为它可能从天线再辐射出去。双平衡混频器采用 180° 型混合电路，若两路二极管的反射系数为  $\rho_1$ 、 $\rho_2$ ，则理论上混频器的隔离度为

$$\text{隔离度 (dB)} = 20\lg[2/(\rho_1 - \rho_2)]$$

当电路很平衡时，本振功率的大小将不影响隔离度。但平衡随频率提高而下降，并随之使隔离度降低，这种关系无法用公式表达，有一个经验的估算法则是：隔离度约以每倍频程 5dB 的速度下降，如在 300MHz 的隔离度为 30dB，则在 600MHz 的隔离度约为 25dB。

LO/RF 的隔离度是指当 IF 端经 50Ω 终端时，在 RF 端测到的本振电平的衰减值。LO/IF 的隔离度是指当 RF 端以 50Ω 终端时，在 IF 端测到的本振电平的衰减值。

通常只规定本振到其它端口的隔离度，因为射频电平远比本振电平低。

#### 4 动态范围

动态范围是指混频器在规定本振电平下，射频输入电平的可用范围。

一般认为动态范围的上限受 1dB 压缩点限制，若 1dB 压缩点的输入电平为 1dBm，即表示其射频输入功率最大不能超过 1.25mW。当然对失真要求更高时，可以规定其上限电平再低一些。

在接收机系统中，混频器动态范围的下限受接收机灵敏度限制，接收机灵敏度可由下式表示

$$P_{\min} = KT_0BN_F(W) = KT_0BN_F \times 10^3 (\text{mW})$$

式中 K 为波尔兹曼常数， $K = 1.38 \times 10^{-23}$  焦耳

$T_0$  为接收机工作环境的绝对温度

B 为等效噪声带宽 (Hz)

$N_F$  为接收机噪声系数

$P_{\min}$  为最小可检测的功率

若以 dBm 为单位，上式可变为

$$\begin{aligned} P_{\min} &= [10\lg K + 10\lg T_0 + 10\lg B + 10\lg N_F + 10\lg 10^3] \\ &= [-174\text{dB} + 10\lg N_F + 10\lg B] \text{dBm} \end{aligned}$$

若  $B = 1\text{MHz} = 1 \times 10^6 \text{Hz}$ ，则

$$\begin{aligned} P_{\min} &= [-174\text{dB}] + 60\text{dB} + 10\lg N_F \\ &= [-114\text{dB} + N_F] \text{dBm} \end{aligned}$$

若混频器噪声系数  $N_F$  为 7dB，则最小可检测功率为 -107dBm，如果系统中指示判据要求最小功率要高于噪声电平 10dB，则动态范围的下限为 -97dBm。接收机带宽变窄，动态范围的下限更小，例如  $B = 100\text{KHz}$ ，则噪声电平降低 10dB，动态范围的下限为 -107dBm。

#### 5 交调性能

在混频器中，有两种主要形式的失真产物——单音交调产物和双音交调产物。

单音交调产物是混频器本振信号和它的谐波对射频信号和它的谐波组合的结果。形式有  $m\text{LO} \pm n\text{RF}$ ，通常把它们分为“阶”。例如本振的三次谐波 ( $m=3$ ) 和射频的二次谐波 ( $n=2$ ) 组合的结果，其交调的产物是 5 阶项 ( $m+n=5$ )。这个项一般更喜欢称为“3 乘 2”。确保分配到二极管的射频和本振功率的一致以及二极管更精密的配对，对降低单音交调产物越有利。单音交调产物还与加到二极管上的射频与本振电压的相位平衡度有关。对谐波来说，相位误差要加倍。因此对于宽带的平衡混频器来说，在带内某些点，相位误差相互抵消，交调产物很小，而在另一些点，相位误差相互加强，交调产物较大是完全正常的。实际的交调抑制可能有  $\pm 15\text{dB}$  的变化，这决定于正确地选择工作频率和实际的交调阶数。

双音交调产物是射频端有两个信号同时加入的结果，这些信号可以产生谐波，互相组合，然后按表达式  $(2\text{RF}1 \pm \text{RF}2) \pm \text{LO} = \text{IF}$  或  $(\text{RF}1 \pm 2\text{RF}3) \pm \text{LO} = \text{IF}$  与本振组合。对这些产物感兴趣是由于它们有相对大的振幅，以及它的频率刚好落在所需中频的两边，很难用滤波器消除。

双音交调产物的输出是与输入电压的立方成正比的，因此又叫双音三阶交调。这表明，如果输入变化 10dB，输出就变为 30dB。

在混频器的输入、输出双对数坐标上，中频输出是基本响应，是所谓 1×1 的一阶响应，它的斜率为 1，双音交调产物是 2×3 的三阶响应，它的斜率为 3，设双音输入的每个音的输入为 0dBm，一般此时的三阶输出为 -60dBm，这表示双音三阶响应比所需的中频输出低 54dB (设变损为 6dB)。假设混频器是个上变频器，把双音输入升至 +10dBm，则三阶响应从 -60dBm 升至 -30dBm，恶化了 30dB。可以引伸这种假设，若双音输入为 +20dBm，则三阶输出又增加了 30dB 而达到 0dB。若输入增为 +30dBm，这时三阶响应也增加到 +30dBm，即双音三阶产物电平等于双音输入电平。

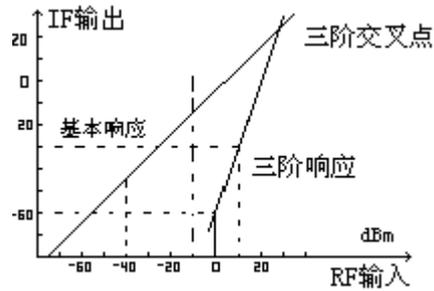


图2 基本响应、三阶响应及交叉点

图2表示混频器的基本响应和三阶响应。两响应的交点即为三阶交叉点。要注意这个点是理论上的一一个假想点，实际上混频器在这个电平已不能工作。但是有了这个点，任何输入电平下的三阶响应就可以估算，并可比较部件的失真性能，混频器的交叉点越高，对三阶交调的抑制越好。

交叉点与1dB压缩点有一定联系，交叉点约比1dB压缩点高出10—15dB，在频率的低端，约高15dB，而在频率的中端和高端约高10dB。

双音三阶交调的测试比较复杂，因为它与工作频率、输入电平、终端阻抗等因素有关，不在给定条件下测试，交调指数就没有意义，因此一般在数据单中不列出交调规格。相对而言，1dB压缩点测试，比较容易，而一旦知道了1dB压缩点，就可以确定混频器的动态范围，并粗略估算交调电平，因此1dB压缩点这个指标非常有用。

利用1dB压缩点确定交调电平的方法如下：（1）找到1dB压缩电平（这是当变损增加1dB时的射频输入电平），（2）确定交叉点，（3）（交叉电平-射频输入电平） $\times$ 3（谐波次数），（4）三阶交调电平=交叉电平-（交叉电平-射频输入电平） $\times$ 3。例如：设混频器的1dB压缩点电平为+1dBm，射频频率处在混频器的顶端，输入电平为-10dBm，问三阶交调电平为多少？解：（1）压缩点电平+1dBm，（2）交叉点电平等于1dBm+15dBm=+16dBm，（3）[16dBm-(-10dBm)] $\times$ 3=78dBm，（4）三阶交调电平=16dBm-78dBm=-62dBm。三阶交调电平比所需的中频输出电平低62dBm。

理论和实践都证明，三阶失真电平是与输入电平的立方成正比的。如果输入电平减少10dB，三阶失真电平就减少30dB，净改善20dB。必须重复强调三阶交调电平是与具体应用情况相关的一个参数，由于应用情况是各种各样的，无法也没有必要事先提供各种状态下的三阶交调电平。