

射频电路开发培训



第十讲 混频器设计

主讲：汪 朋

QQ: 3180564167

01

混频器意义和本质

02

二极管混频器原理

03

晶体管混频器原理

04

基于ADS的二极管混频器设计

05

基于ADS的晶体管混频器设计

Part

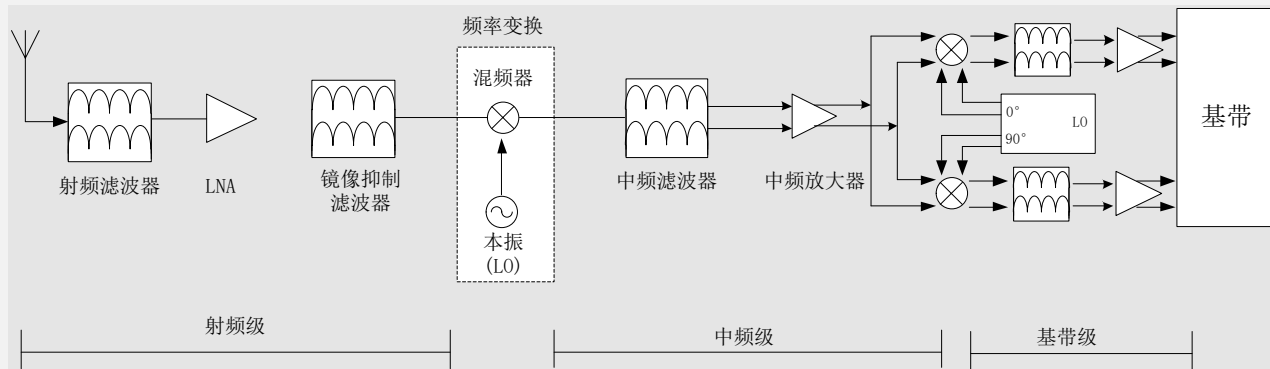
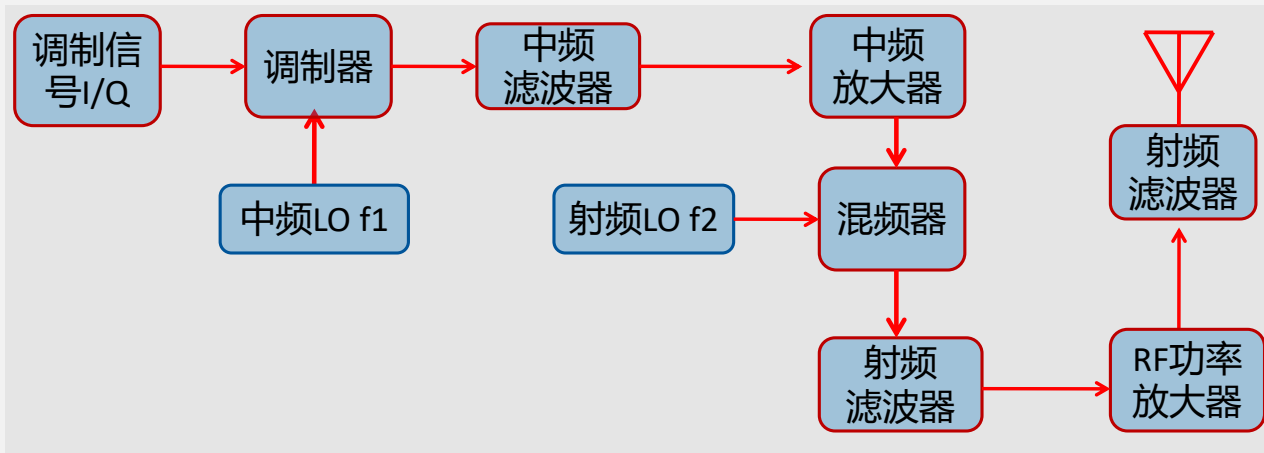
1

混频器意义和本质

混频器

混频器意义

混频器为频谱搬移电路，实现频率变换，其作用为将两个不同频率的信号分解为两者的和频信号和差频信号，发射机为上变频，接收机为下变频



混频器

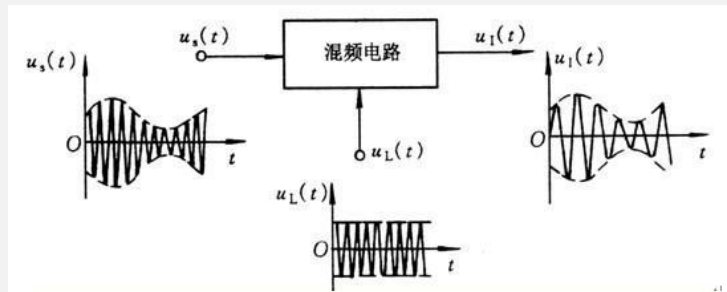
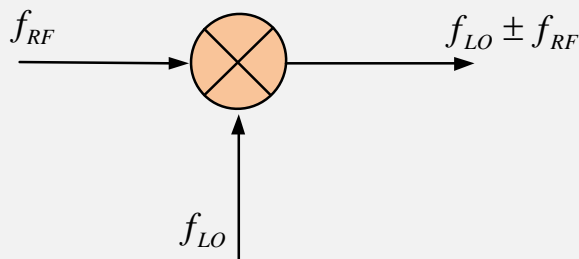
混频器本质

混频器为时变或非线性，其频率变换的本质为射频信号RF和本振信号LO在时间域的乘积

本振信号 $V_{LO} \cos \omega_{LO} t$ ，射频信号 $V_{RF} \cos \omega_{RF} t$

$$(V_{RF} \cos \omega_{RF} t)(V_{LO} \cos \omega_{LO} t) = \frac{V_{RF} V_{LO}}{2} [\cos(\omega_{RF} - \omega_{LO})t + \cos(\omega_{RF} + \omega_{LO})t]$$

三端口器件



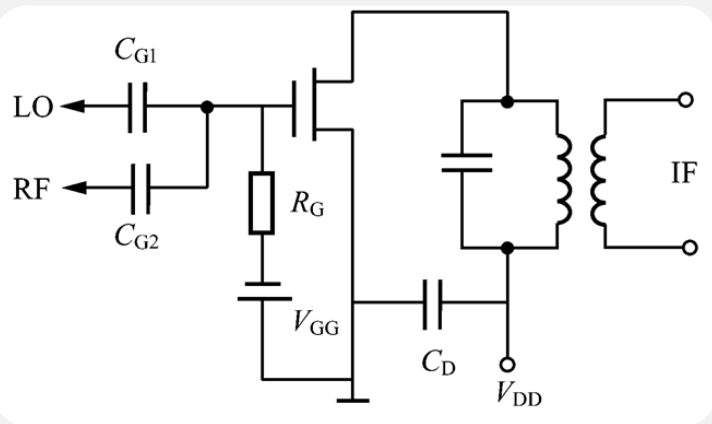
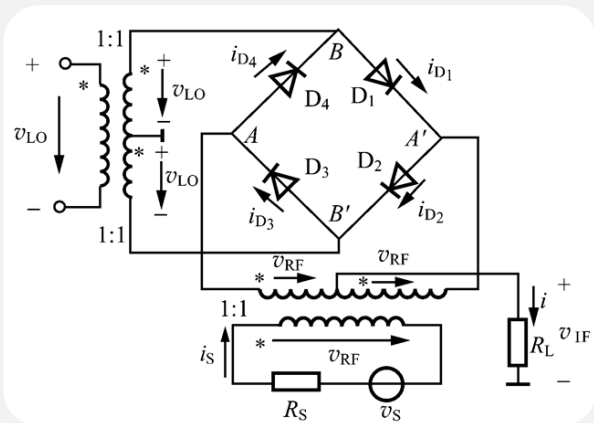
混频器

混频器分类

无源混频器和有源混频器的区别在于有无功率增益

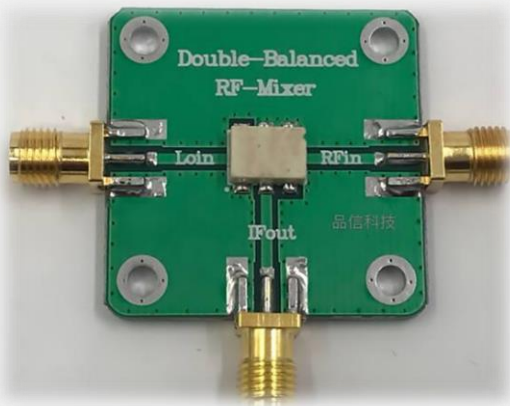
无源混频器：通常由二极管和工作在可变电阻区的场效应管构成，增益小于1，功率减少的部分为混频损耗；

有源混频器：增益大于1，可以降低混频后的噪声影响，由场效应管和双极性晶体管组成



混频器

混频器性能指标



[1] 增益

输出中频信号的大小与输入射频信号的比值

$$A_v = \frac{V_{IF}}{V_{in}}, GP = \frac{P_{IF}}{P_{in}} = \frac{V_{IF}^2 / R_L}{V_{RF}^2 / R_S}$$

[2] 噪声

输入端的信噪比和混频器输出端的信噪比之比

[3] 线性指标

(1) 1dB压缩点

(2) 线性动态范围

[4] 端口隔离度

本振信号端口、射频信号端口和中频输出端口间的相互干扰程度

[5] 失真

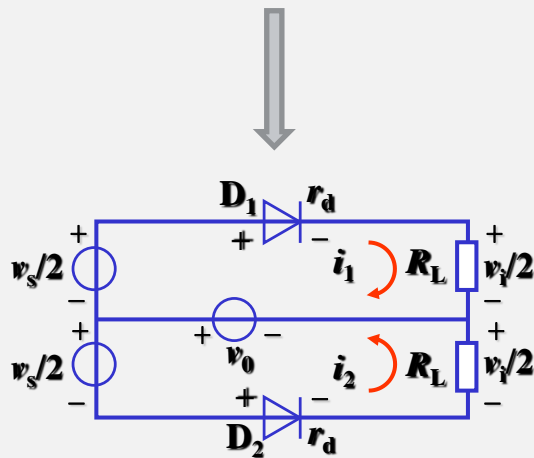
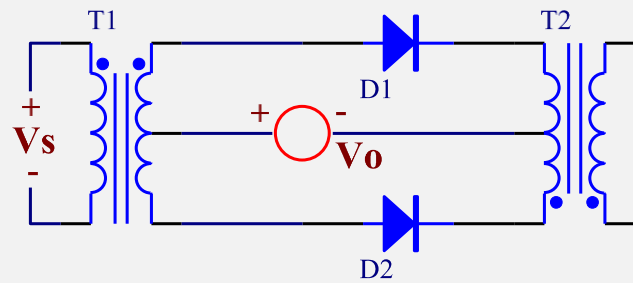
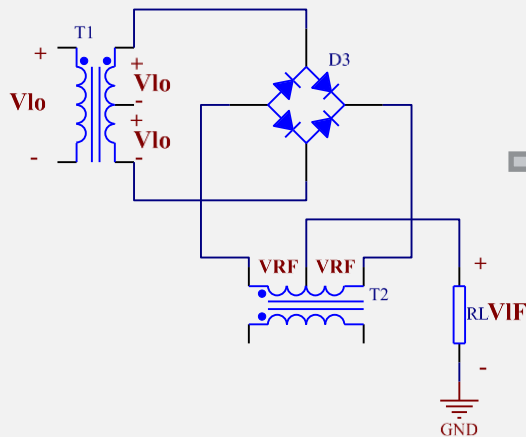
Part

2

二极管混频器原理

混频器

二极管混频器



信号电压： $V_s = V_{sm} \cos \omega_s t$

本振电压： $V_o = V_{om} \cos \omega_o t$

工作条件： $V_{om} > V_{sm}$

信号 v_s 加在两个二极管上的极性总是一个正向，一个反向；

本振信号相当于一个开关信号，令两个二极管工作在开关状态。开关频率为本振信号的频率 $\omega_o/2\pi$ 。

混频器

二极管混频器

因为 $V_{0m} > V_{sm}$ ，如图所示，当 $V_0 > 0$ 时， D_1 、 D_2 均导通，产生电流 i_1 和 i_2 。

当 $V_0 < 0$ 时， D_1 、 D_2 均截止，电路不产生电流。

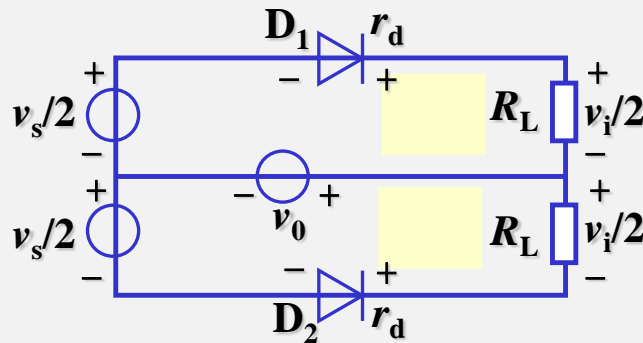
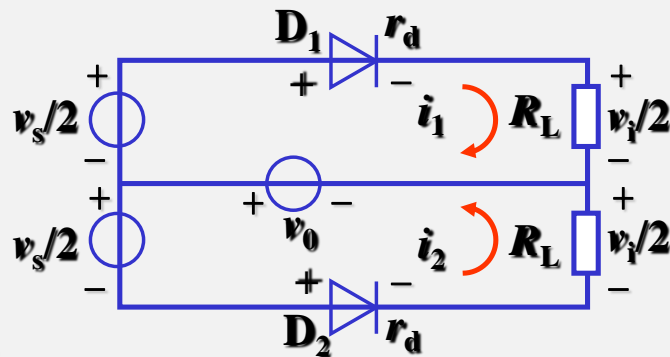
电流分析：

$$S(t) = \begin{cases} 1 (v_o > 0) \\ 0 (v_o < 0) \end{cases}$$

$$i_1 = \frac{I}{R_d + R_L} \left(\frac{1}{2} v_s + v_o \right) S(t)$$

$$i_2 = \frac{I}{R_d + R_L} \left(v_o - \frac{1}{2} v_s \right) S(t)$$

开关函数其实是由本机振荡产生的，其频率与本振频率相同。



混频器

二极管混频器

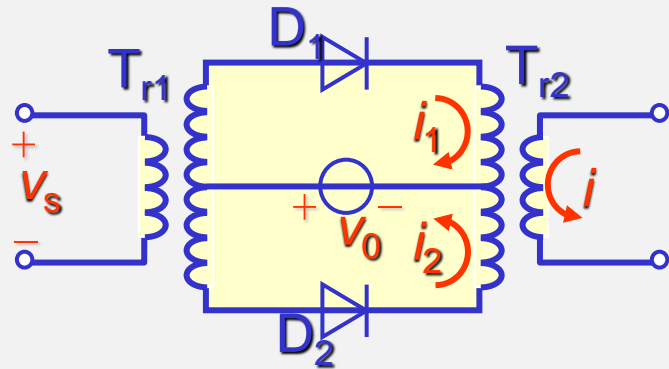
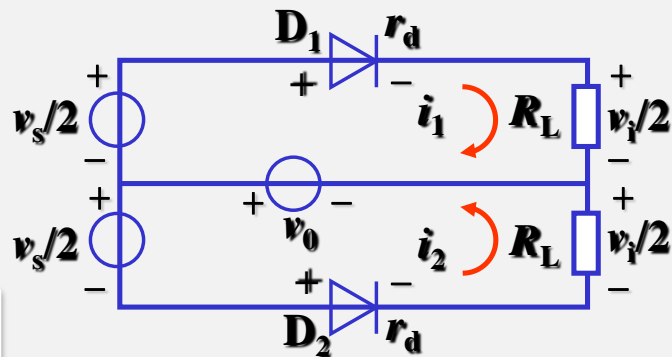
$$i = i_1 - i_2 = \frac{I}{R_d + R_L} v_s S(t)$$

$$S(t) = (1/2) + (2/\pi) \cos w_0 t - (2/3\pi) \cos 3w_0 t + (2/5\pi) \cos 5w_0 t + \dots$$

$$\begin{aligned} i = i_1 - i_2 &= \frac{I}{R_d + R_L} v_s S(t) = \frac{I}{R_d + R_L} S(t) V_{sm} \cos w_s t \\ &= \frac{(1/2) + (2/\pi) \cos w_0 t - (2/3\pi) \cos 3w_0 t + (2/5\pi) \cos 5w_0 t + \dots}{R_d + R_L} \times V_{sm} \cos w_s t \end{aligned}$$

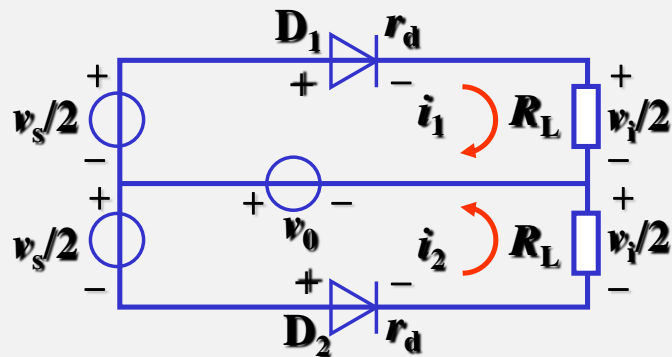
由三角函数积转和差公式可以获得新的频率分量

$$w_s, w_0 \pm w_s, 3w_0 \pm w_s, 5w_0 \pm w_s, \dots$$



混频器

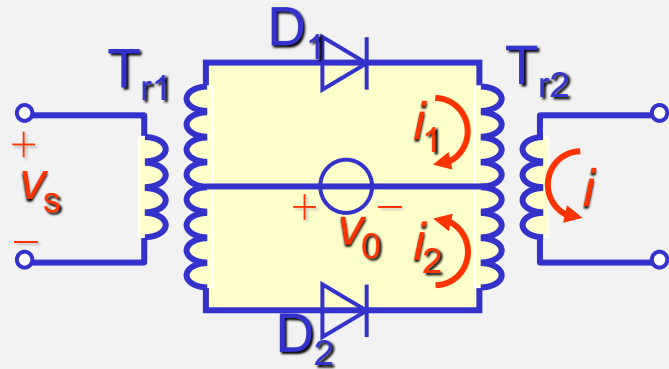
二极管混频器



二极管平衡混频器产生的频率

$$\omega_s, \omega_0 \pm \omega_s, 3\omega_0 \pm \omega_s, 5\omega_0 \pm \omega_s, \dots$$

在二极管平衡混频器的输出信号中，仍包含有 ω_s 这个频率， ω_s 与 $(\omega_0 - \omega_s)$ 比较接近，容易对 $(\omega_0 - \omega_s)$ 产生干扰，为了消除 ω_s ，可使用二极管环形混频器。



混频器

二极管环 形混频器

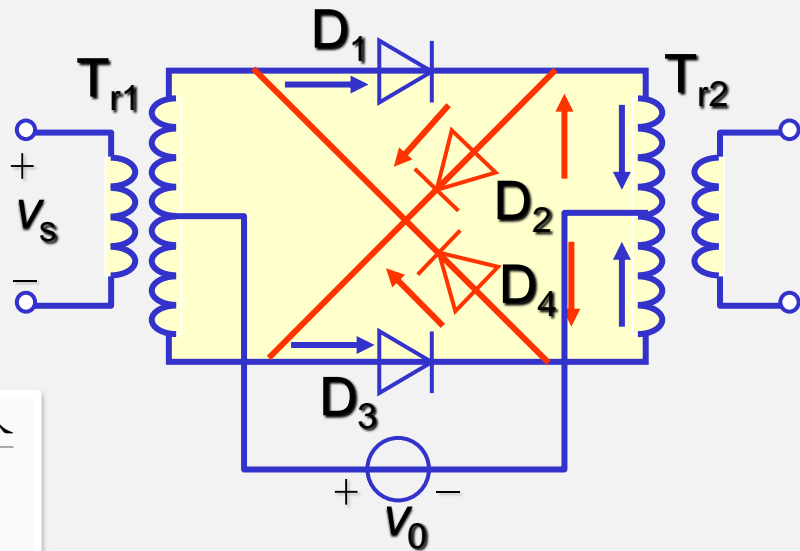
二极管环形混频器就是在二极管平衡混频器的基础上增加了两个反向连接的二极管。

二极管环形混频器与二极管平衡混频器的区别为：

$v_0 > 0$ 时， D_1 、 D_3 导通， D_2 、 D_4 截止；

$v_0 < 0$ 时， D_1 、 D_3 截止， D_2 、 D_4 导通

区别：即在本振电压 v_0 的正、负半周中，都有二极管导通，都产生电流。



混频器

二极管环形混频器

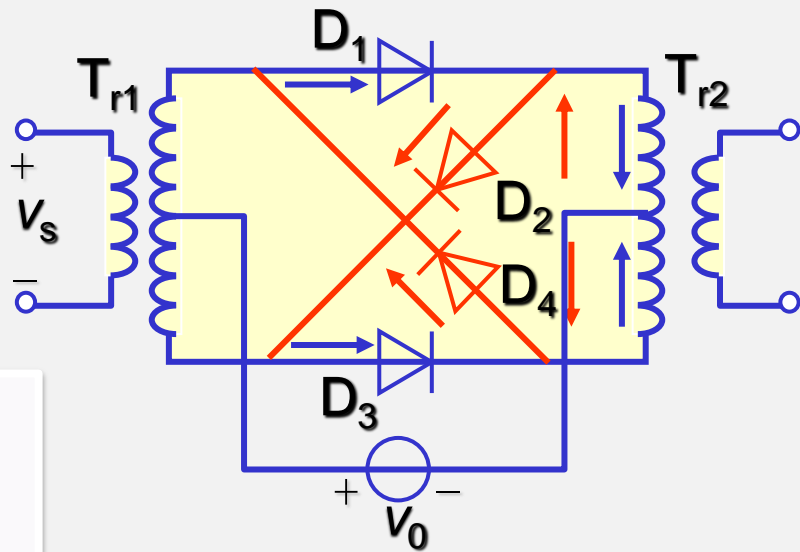
当 $v_0 > 0$ 时, D1、D3 导通, D2、D4 截止:

$$i' = i_1 - i_3 = \frac{I}{R_d + R_L} v_s S(t)$$

当 $v_0 < 0$ 时, D1、D3 截止, D2、D4 导通

$$S'(t) = \begin{cases} 0 & (v_o > 0) \\ 1 & (v_o < 0) \end{cases}$$

$$i'' = i_1 - i_3 = \frac{-I}{R_d + R_L} v_s S'(t)$$



混频器

二极管混频器

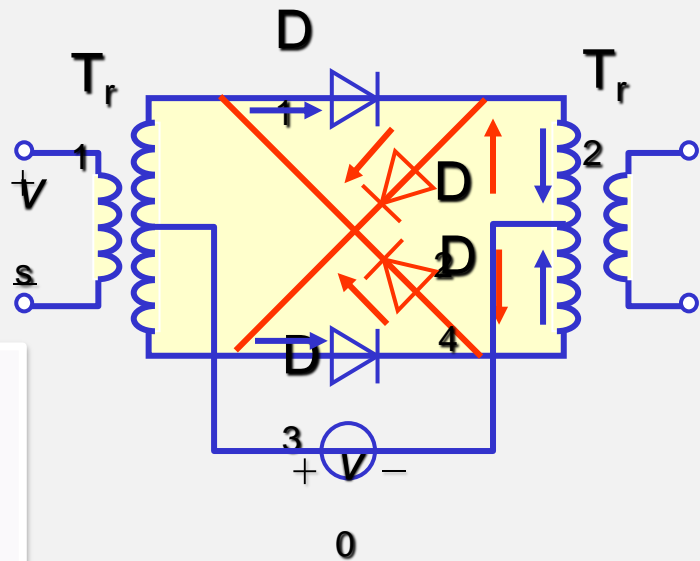
$$S(t) = (1/2) + (2/\pi^2/\pi)c_0 t - (2/3\pi^2/3\pi)w_0 t + (2/5\pi^2/5\pi)w_0 t + \dots$$

$$S'(t) = (1/2) - (2/\pi^2/\pi)c_0 t + (2/3\pi^2/3\pi)w_0 t - (2/5\pi^2/5\pi)w_0 t + \dots$$

$$i = \frac{I}{Rd + RL} Vsmcoswst \left[\frac{4}{\pi} cosw_0 t - \frac{4}{3\pi} cos3w_0 t + \dots \right]$$

由三角函数积转和差公式可以获得新的频率分量

$$w_0 \pm w_s, 3w_0 \pm w_s, 5w_0 \pm w_s, \dots$$



Part

3

晶体管混频器原理

混频器

晶体管有源混频器

单平衡混频器

- [1] Q1 是射频小信号线性放大器 (输入跨导级)
- [2] 差分对 Q2、Q3 是在本振大信号作用下 的轮流导通双向开关
- [3] 当双端输出时, 输出电流是两电流 i_2 和 i_3 的差;
- [4] Q1工作在放大区

$$i_c = I_{CQ1} + g_{m1}v_{RF}$$

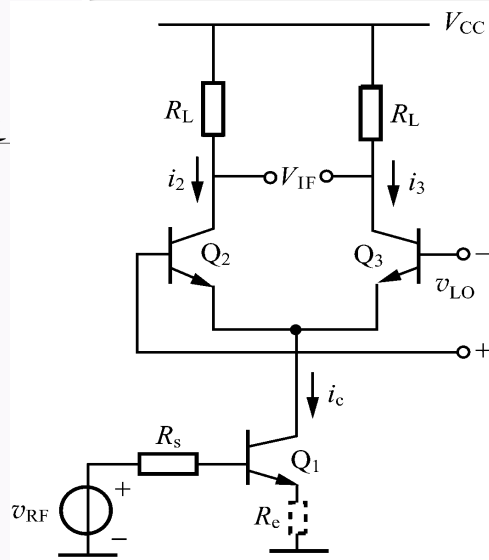
- [5] 差分放大级Q2和Q3

$$v_{IF} = iR_L = (i_2 - i_3)R_L$$

$$i_2 = \frac{i_c}{2} \left(1 + th \frac{q}{2kT} v_{LO}(t) \right)$$

$$i_3 = \frac{i_c}{2} \left(1 - th \frac{q}{2kT} v_{LO}(t) \right)$$

$$i = i_2 - i_3 = i_c th \frac{q}{2kT} v_{LO}(t)$$



混频器

晶体管有源混频器

单平衡混频器

$$i = i_2 - i_3 = i_c th \frac{q}{2kT} v_{LO}(t) i_c S_2(\omega_{LO}t) = (I_{CQ1} + g_{m1}v_{RF})S_2(\omega_{LO}t)$$

$$S_2(\omega_{LO}t) = \frac{4}{\pi} \cos \omega_{LO}t - \frac{4}{3\pi} \cos 3\omega_{LO}t + \dots$$

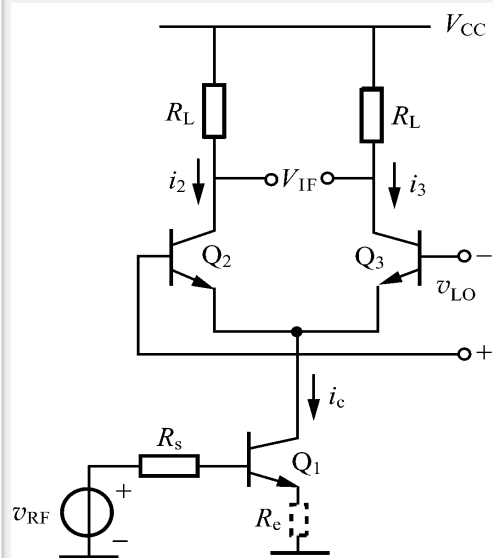
混频后频率

$$p\omega_{LO}, p\omega_{LO} \pm \omega_{RF}, p=1,3,5$$

$$i_{IF} = \frac{2}{\pi} g_{m1} V_{RF} \cos(\omega_{RF} - \omega_{LO}) = I_{IF} \cos \omega_{IF}t$$

混频器电压增益

$$A_v = \frac{V_{IF}}{V_{RF}} = \frac{2}{\pi} g_{m1} R_L$$



混频器

晶体管有源混频器

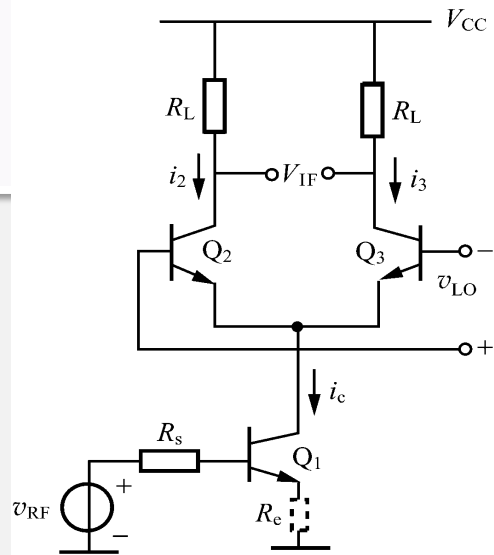
单平衡混频器

$$i = i_2 - i_3 = i_c th \frac{q}{2kT} v_{LO}(t) i_c S_2(\omega_{LO}t) = (I_{CQ1} + g_{m1}v_{RF})S_2(\omega_{LO}t)$$

$$S_2(\omega_{LO}t) = \frac{4}{\pi} \cos \omega_{LO}t - \frac{4}{3\pi} \cos 3\omega_{LO}t + \dots$$

混频后频率

$$p\omega_{LO}, p\omega_{LO} \pm \omega_{RF}, p = 1, 3, 5$$



混频器

晶体管有源混频器

Gilbert双平衡混频器

Gilbert双平衡混频器的本振信号和射频信号均采用了差分输入的模式，中频信号采用差分输出的模式

$$I_4 - I_5 = I_6 e^{\frac{qV_{LO}}{2KT}}$$

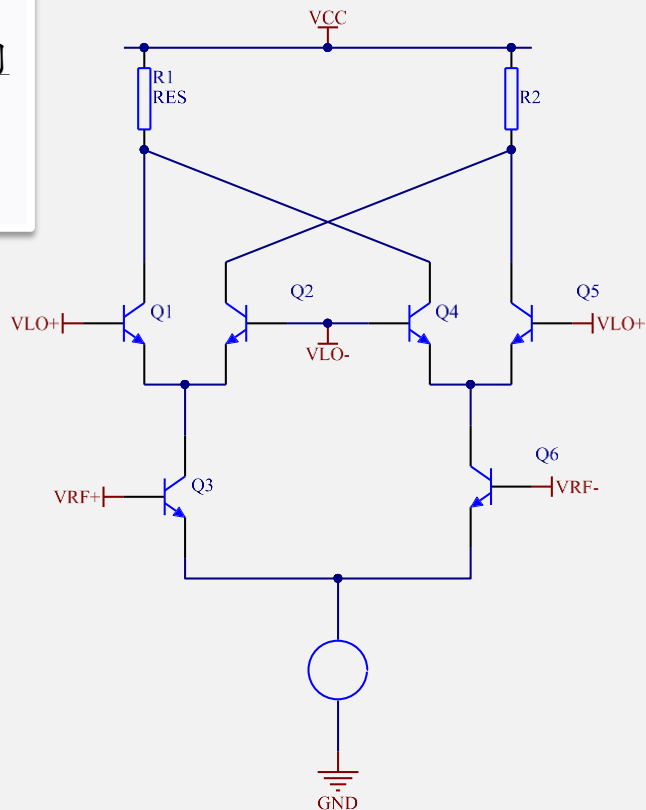
$$I = (I_3 - I_6) e^{\frac{qV_{LO}}{2KT}}$$

$$S(t) = e^{\frac{qV_{LO}}{2KT}}$$

对于RF信号而言，由于RF信号非常小，因此可以利用数学关系做等效

$$S(t) = e^{\frac{qV_{RF}}{2KT}} \approx \frac{qV_{RF}}{2KT}$$

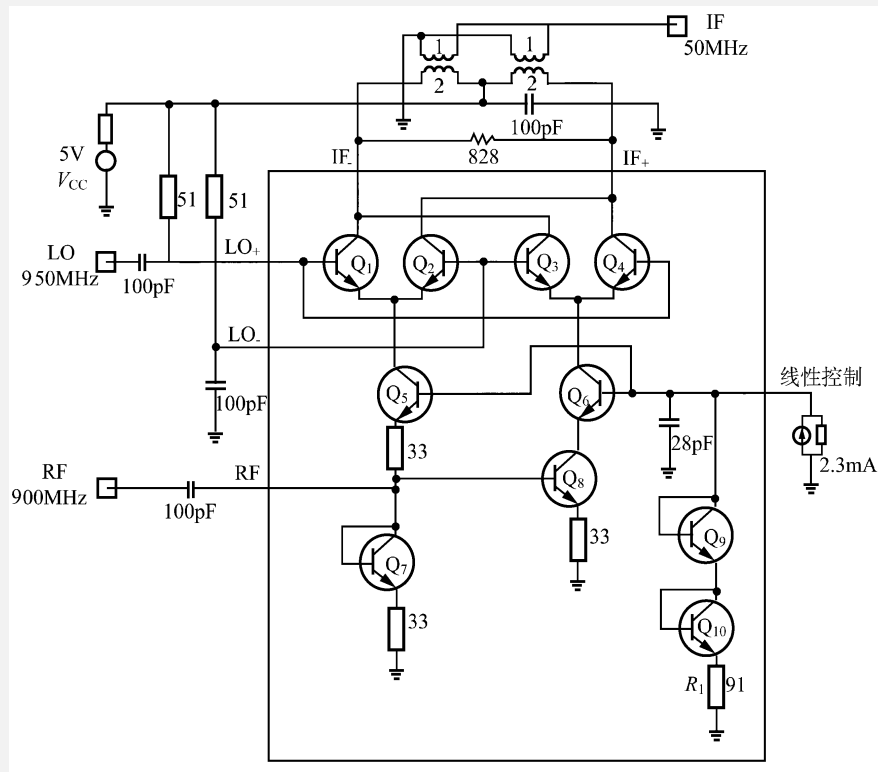
$$I_0 = I e^{\frac{qV_{RF}}{2KT}} S(w_{LO}t) = I \cdot \frac{qV_{RF}}{2KT} \cdot S(w_{LO}t) = I \cdot gm V_{RF} \cdot S(w_{LO}t)$$



混频器

混频器集成电路

摩托罗拉MC13143



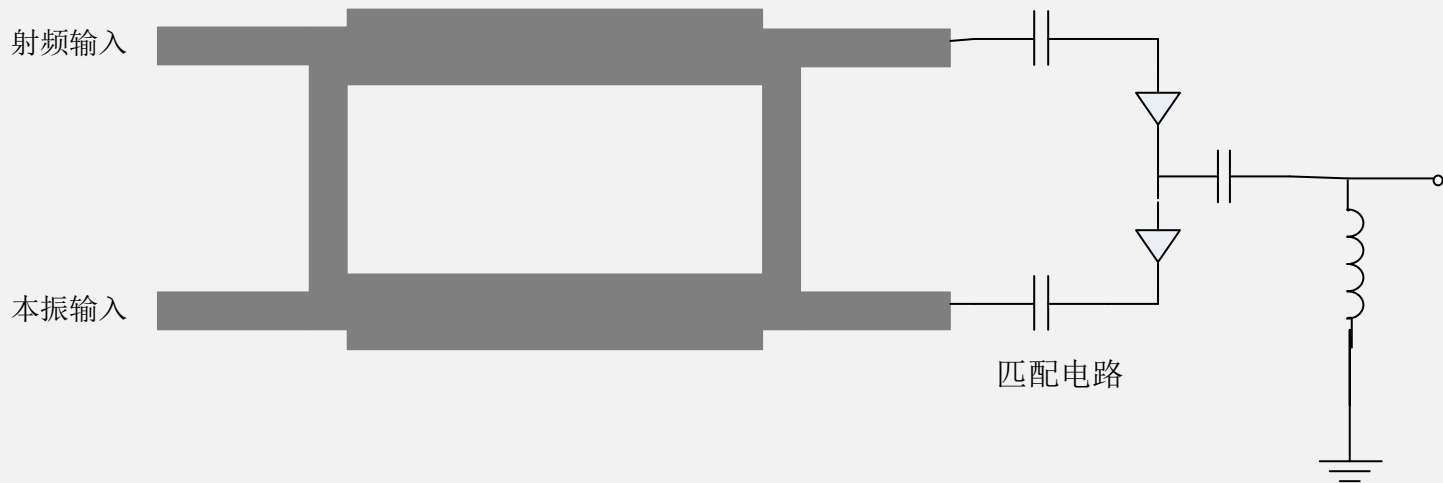
Part

4

无源混频器设计

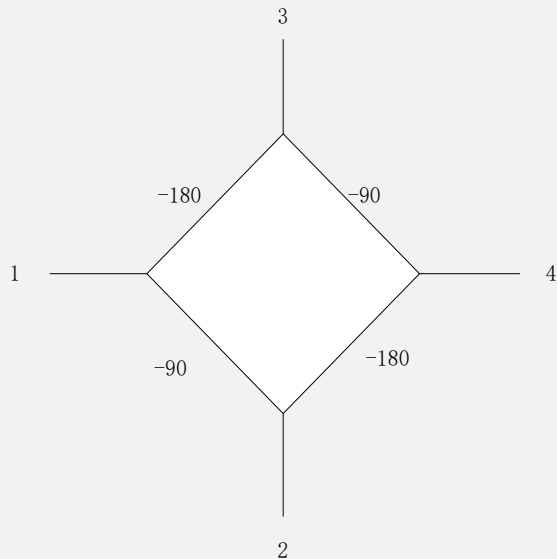
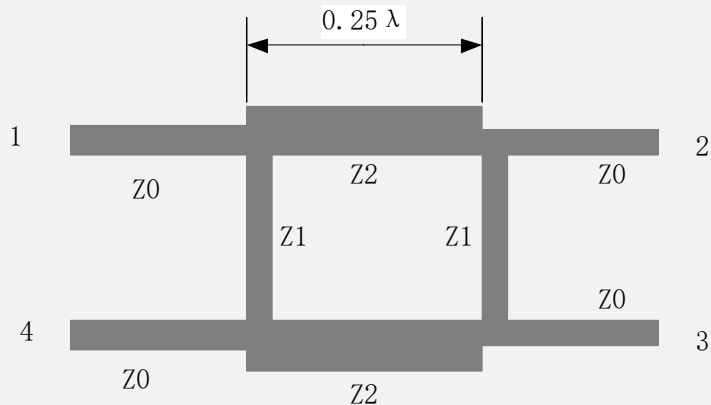
混频器

晶体管无源混频器设计



混频器

晶体管无源混频器设计



端口1为输入端 端口2为耦合端3，端口4为隔离端
如果输入端完全匹配则 $S_{11}=0$:

$$Y_1^2 = Y_2^2 - 1$$

$$Y_1 = z_0/z_1, Y_2 = z_0/z_2$$

根据双分支定向耦合器散射矩阵，端口1、4彼此隔离

$$\text{则: } S_{14} = S_{41} = 0, \quad \arg\left(\frac{S_{12}}{S_{13}}\right) = 90^\circ$$

实现端口2和3等分输出的条件:

$$z_2 = z_0 / \sqrt{2}, \quad z_1 = z_0$$

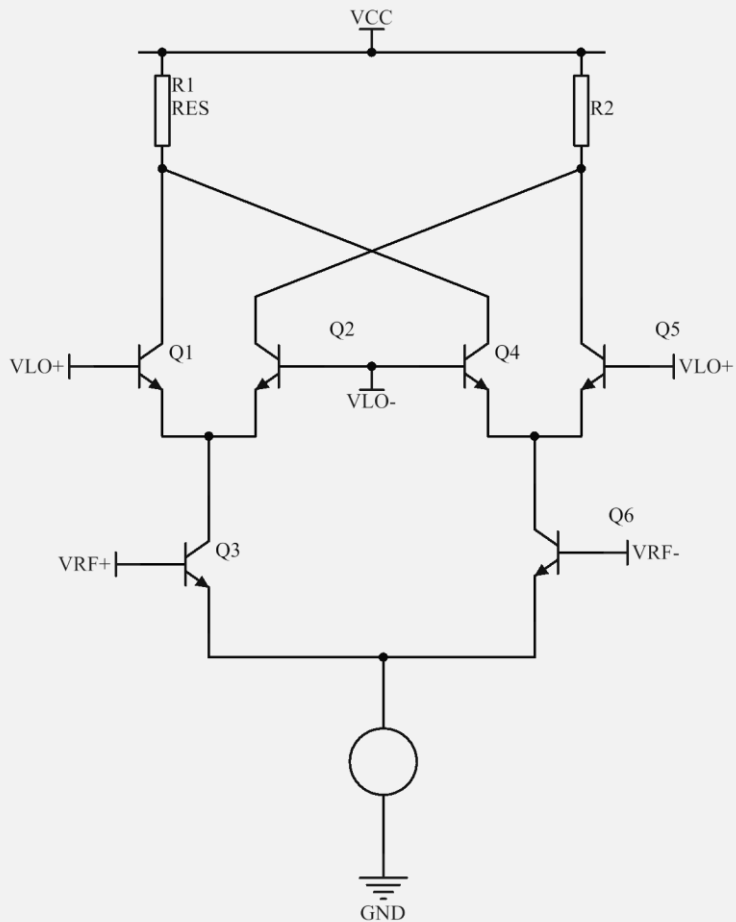
Part

5

基于ADS的有源混频器设计

混频器

晶体管有源混频器





THANK YOU !!