



第 6 章 振幅调制、解调及混频

➤ 6.1 振幅调制

➤ 6.2 调幅信号的解调

➤ 6.3 混频

➤ 6.4 混频器的干扰



6.3 混频

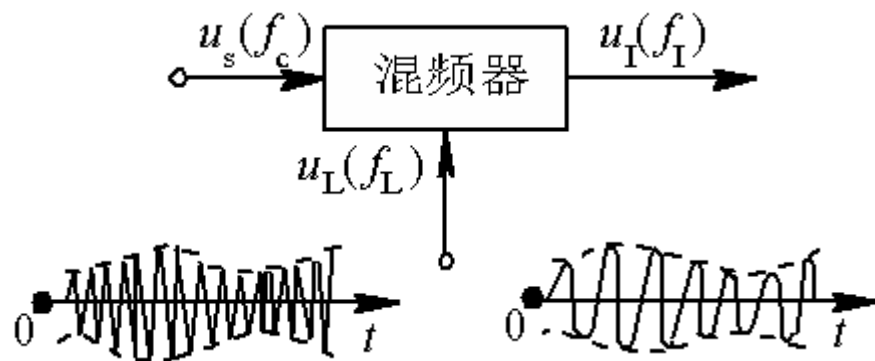
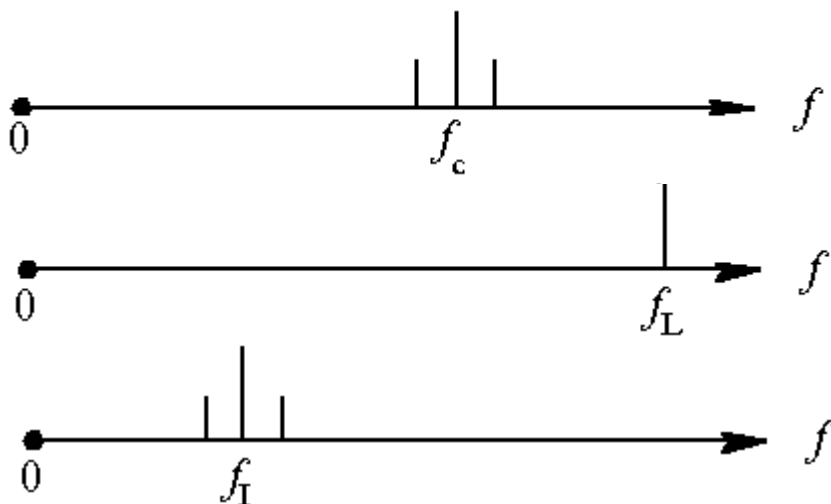
一、混频的概述

定义：混频，又叫变频，也是频谱的线性搬移过程，它是使信号自某一频率变换成另一频率的过程。

通常是把已调高频信号的载波从高频变为中频，其调制规律不变。

混频器的功能：他是频谱线性搬移电路，是一个 6 端网络。

它在频域上起着减（加）法的作用。



混频器的输出信号称为中频信号，其频率是 f_c 和 f_L 的和频或差频： f_c



6.3 混频

一、混频的概述

特点：

- (1) 混频器输入输出均是高频信号；
- (2) 输入输出除了载波（中心频率）不同之外，频谱结构完全相同。体现在波形上，则是其包络不变，只是其填充频率不同（内部波形疏密程度不同）
- (3) 混频器是频率变换电路，在频率上起加减法器的作用。

当 $f_I > f_c$ 时， \rightarrow 上变频

当 $f_I < f_c$ 时， \rightarrow 下变频

调制、解调、混频的不同：

调制： $F \square f_c \square F$

解调： $f_c \square F \square F$

混频： $f_c \square F \square f_I \square F$



6.3 混频

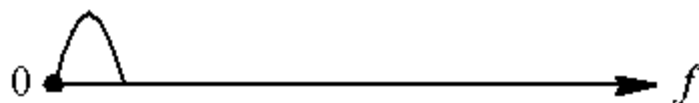
一、混频的概述

调制、解调、混频的不同：

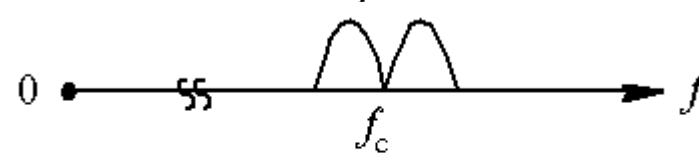
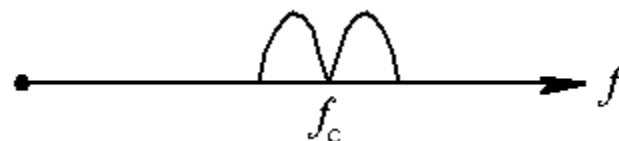
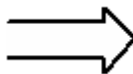
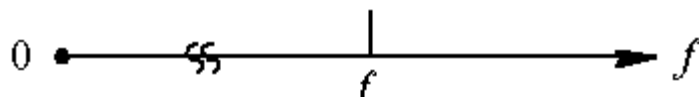
调制： $F \ll f_c \ll F$

解调： $f_c \ll F \ll F$

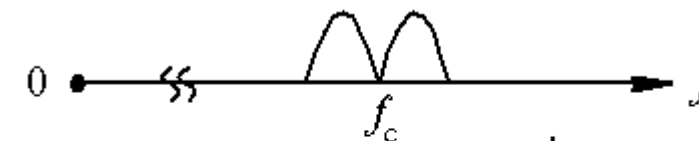
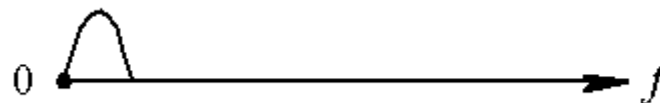
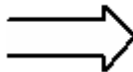
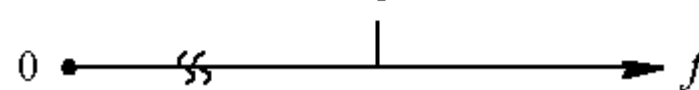
混频： $f_c \ll F \ll f_I \ll F$



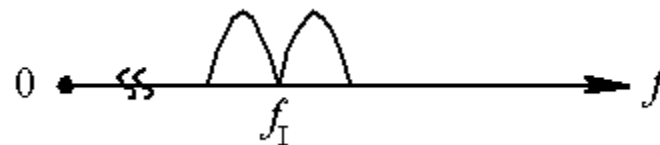
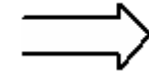
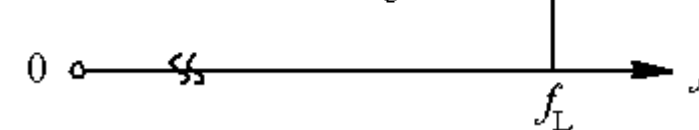
调制



解调



混频



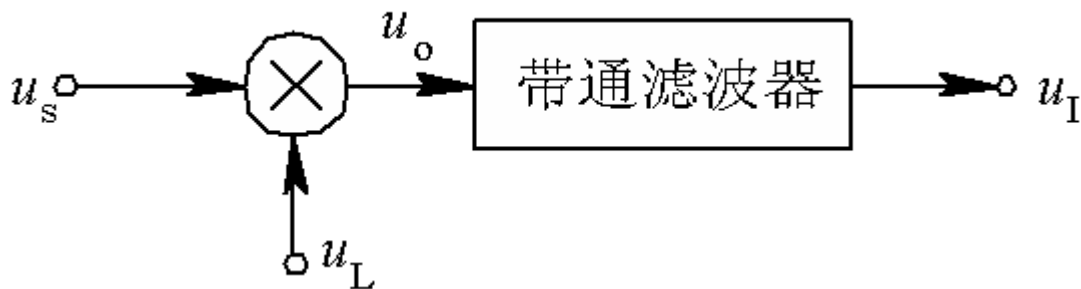


6.3 混频

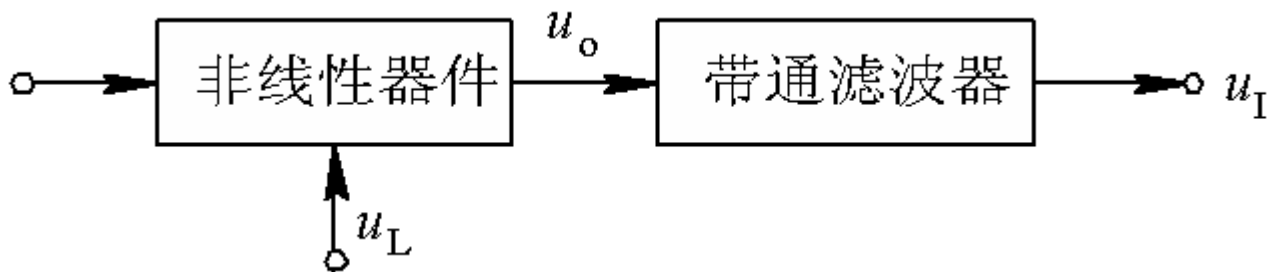
一、混频的概述

2、混频器的工作原理

由前面的分析可知，完成频谱的线性搬移功能的关键是获得两个信号的乘积。能找到这个乘积，就可以完成所需的线性搬移功能。



信号乘积项可用非线性电路和线性时变电路来完成





6.3 混频

一、混频的概述

2、混频器的工作原理

设输入到混频器中的输入已调信号 u_s 和本振电压 u_L 分别为：

$$\left. \begin{aligned} u_s &= U_s \cos \Omega t \cos \omega_c t \\ u_L &= U_L \cos \omega_L t \end{aligned} \right\} \square$$

$$\begin{aligned} u_s u_L &= U_s U_L \cos \Omega t \cos \omega_L t \cos \omega_c t \\ &= \frac{1}{2} U_s U_L \cos \Omega t [\cos(\omega_L + \omega_c)t + \cos(\omega_L - \omega_c)t] \end{aligned}$$

设 $f_I = f_L - f_c$ ，经带通滤波器后：

$$u_I = U_I \cos \Omega t \cos \omega_I t$$



6.3 混频

一、混频的概述

2、混频器的工作原理

混频器的频域工作原理：

本振为单一频率信号，其频谱为：

$$F_L(\omega) = \pi[\delta(\omega - \omega_c) + \delta(\omega + \omega_c)]$$

输入信号为已调波，其频谱为 $F_s(\omega)$ ，则

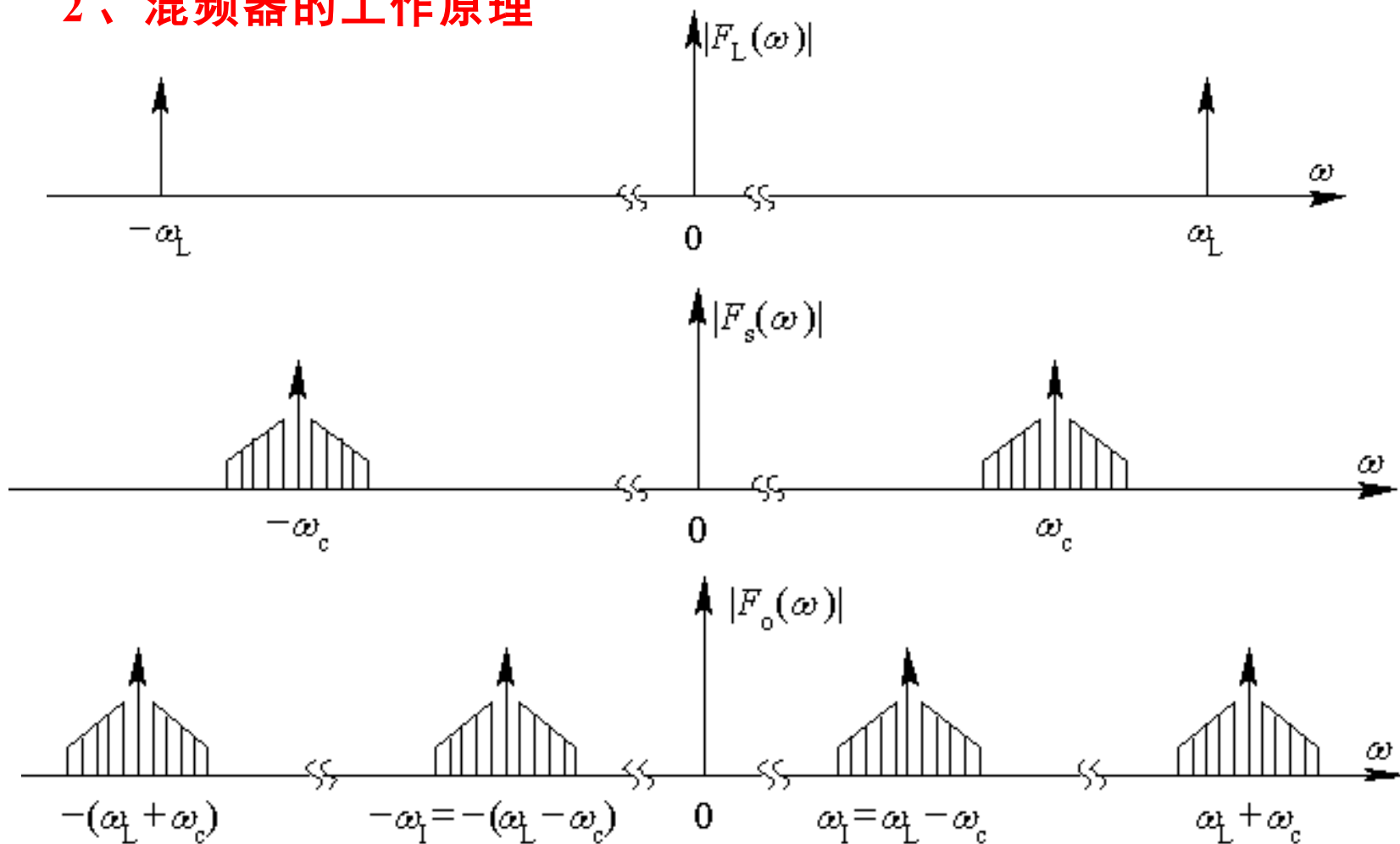
$$\begin{aligned} F_o(\omega) &= \frac{1}{2\pi} F_s(\omega) * F_L(\omega) = \frac{1}{2} F_s(\omega) * [\delta(\omega - \omega_c) + \delta(\omega + \omega_c)] \\ &= \frac{1}{2} [F_s(\omega - \omega_c) + F_s(\omega + \omega_c)] \end{aligned}$$



6.3 混频

一、混频的概述

2、混频器的工作原理





6.3 混频

一、混频的概述

2、混频器的工作原理

混频器 { **混频：** 由单独的振荡器提供本振电压，6 端网络
变频： 振荡和混频功能由一个非线性器件完成，四端网络。



6.3

混频

一、混频的概述

3、混频器的主要性能指标

1) 变频增益

它可定义为变频器中频输出电压振幅 U_I 与高频输入信号电压振幅 U_s 之比，即：

$$K_{vc} = \frac{U_I}{U_s}$$

或者定义为输出中频信号功率 P_I 与输入高频信号功率 P_s 之比，即

$$K_{pc} = \frac{P_I}{P_s}$$

通常用分贝数表示变频增益，有：

☐
☐
☐
☐
☐
☐

$$K_{vc} = 20 \lg \frac{U_I}{U_s} (dB)$$

☐
☐
☐
☐
☐
☐

$$K_{pc} = 10 \lg \frac{P_I}{P_s} (dB)$$



6.3 混频

一、混频的概述

3、混频器的主要性能指标

2) 噪声系数

混频器的噪声系数 N_F 定义为：

$$N_F = \frac{\text{输入信噪比 (信号频率)}}{\text{输出信噪比 (中频频率)}}$$

3) 失真与干扰

变频器的失真有**频率失真**和**非线性失真**。除此之外，还会产生各种非线性干扰，如组合频率、交叉调制和互相调制、阻

塞和倒易混频等干扰。所以，对混频器不仅要求频率特性好，

而且还要求变频器工作在非线性不太严重的区域，使之既能



6.3 混频

一、混频的概述

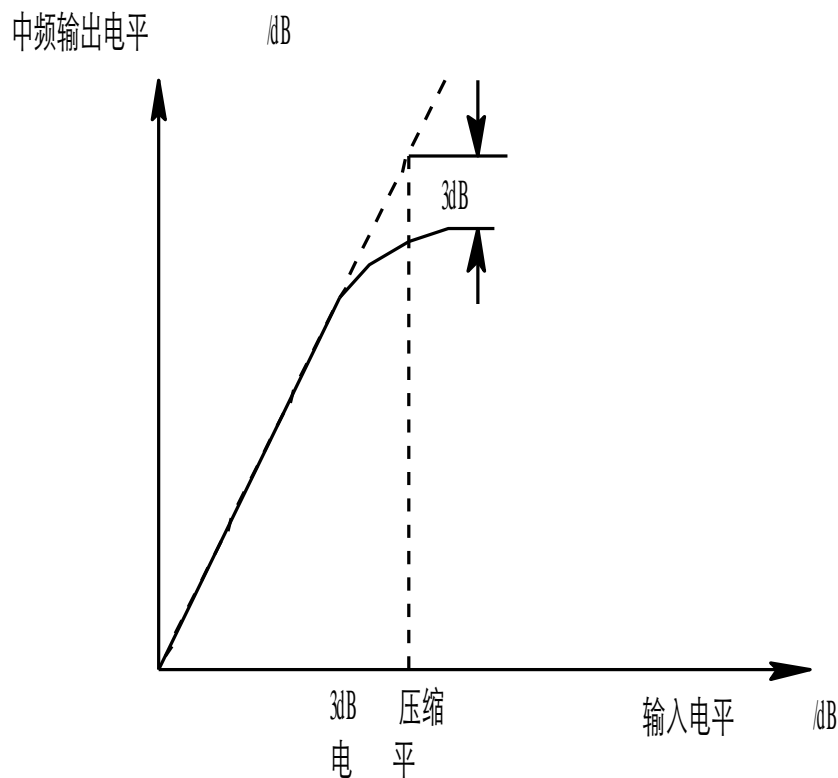
3、混频器的主要性能指标

4) 变频压缩 (抑制)

在混频器中, 输出与输入信号幅度应成线性关系。

实

际上, 由于非线性器件的限制, 当输入信号增加到一定程度时, 中频输出信号的幅度与输入不再成线性关系, 这一现象称为变频压缩, 如图所示。



可用使实际输入电平低于其理想电平值一定值 (如 3dB 或 1dB) 的输入电平的大小来表示它的压缩性能的好坏。

此电平称为混频器的 3dB (或 1dB) 压缩电平。此电平越大, 性能越好。



6.3 混频

一、混频的概述

3、混频器的主要性能指标

5) . 选择性

在混频器的输出中,由于各种原因,总会混杂很多与中频频率接近的干扰信号。

为了抑制不需要的干扰,要求中频输出回路有良好的选择性。



6.3 混频

二、混频电路

路1. 晶体三极管混频器

(1) 原理

时变偏置: $U_{BB}(t) = U_{BB} + u_L$

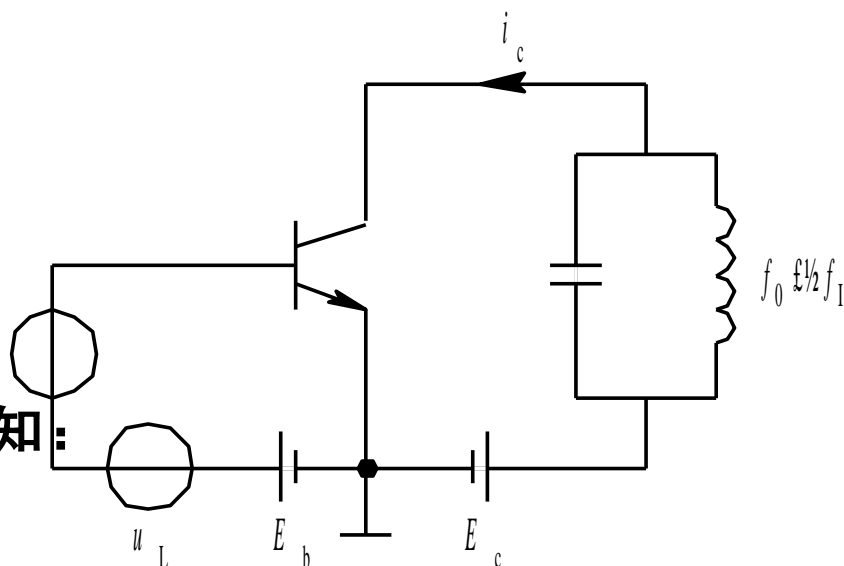
$U_L \gg U_s$ 则由第五章内容可知:

$$i_C \approx I_{c0}(t) + g_m(t)u_s$$

$$= I_{c0}(t) + (g_{m0} + g_{m1} \cos \omega_L t + g_{m2} \cos 2\omega_L t + \text{?})u_s$$

经集电极谐振回路滤波后, 得到中频电流 i_1

$$i_1 = \frac{1}{2} g_{m1} U_s \cos(\omega_L - \omega_c)t = \frac{1}{2} g_{m1} U_s \cos \omega_1 t$$





6.3 混频

二、混频电路

1. 晶体三极管混频器

(1) 原理

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{1}{2} g_{m1} U_s \cos(\omega_L - \omega_c)t = \frac{1}{2} g_{m1} U_s \cos \omega_1 t \\ &= g_c U_s \cos \omega_1 t = I_1 \cos \omega_1 t \end{aligned}$$

式中， $g_c = g_{m1} / 2$ —— 变频跨导

g_L 只与晶体管特性，直流工作点及本阵电压 U_L 有关，与 U_s 无关



6.3 混频

二、混频电路

1. 晶体三极管混频器

(2) 变频跨导

$$g_C = \frac{\text{输出中频电流振幅}}{\text{输入高频电压振幅}} = \frac{I_I}{U_s} = \frac{1}{2} g_{m1}$$

表征输入信号电压对输出中频电流的控制能力

g_c 的求法： (a) 解析法； (b) 图解法

(a) 解析法

$$g_m(t) = \frac{di_c}{du_{be}} \Big|_{u_{be}=U_{BB}(t)}$$

$$g_{m1} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} g_m(t) \cos \omega_L t d\omega_L t$$

$$g_C = \frac{1}{2} g_{m1} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} g_m(t) \cos \omega_L t d\omega_L t$$



6.3 混频

二、混频电路

1. 晶体三极管混频器

(2) 变频跨导

(b) 图解法

步骤：

特性曲线 $i_c \sim u_{be}$ 微分 $g_m \sim u_{be}$

$u_{be} = U_{BB}(t)$ $g_m(t)$ g_{m1}

g_c



6.3 混频

二、混频电路

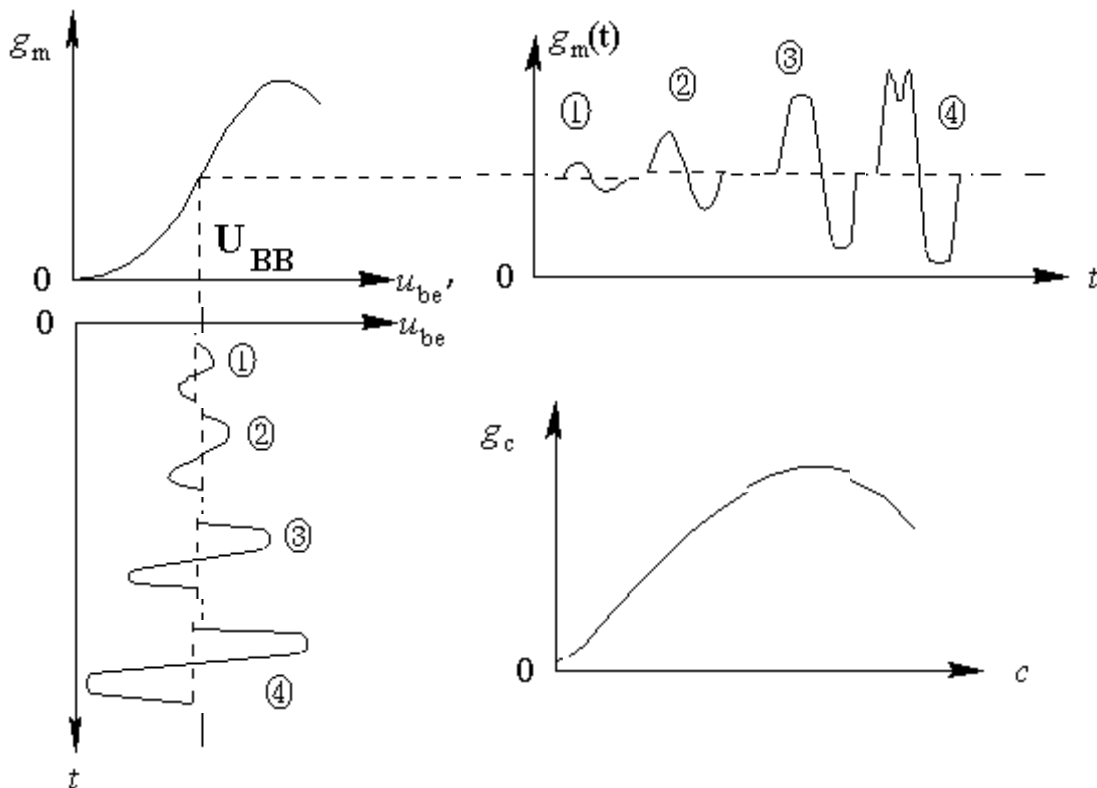
1. 晶体三极管混频器

(2) 变频跨导

$g_c \sim U_L$ 的关系：

➤ 当 U_{BB} 不变时，当 U_L 从 0 起，在较小范围内变化时，未超出 g_m 曲线的线性部分， g_c 与 u_L 成正比。
当 U_L 较大时，随 U_L 的增加 g_c 加大，但由于开始进入 g_m 曲线的弯曲部分，所以 g_c 增大速度逐渐缓慢。

➤ 当 U_L 很大时，由于 g_m 曲线开始下降， g_m 曲线上不发生凹陷，基波分量下降，因此 g_c 下降。





6.3 混频

二、混频电路

1. 晶体三极管混频器

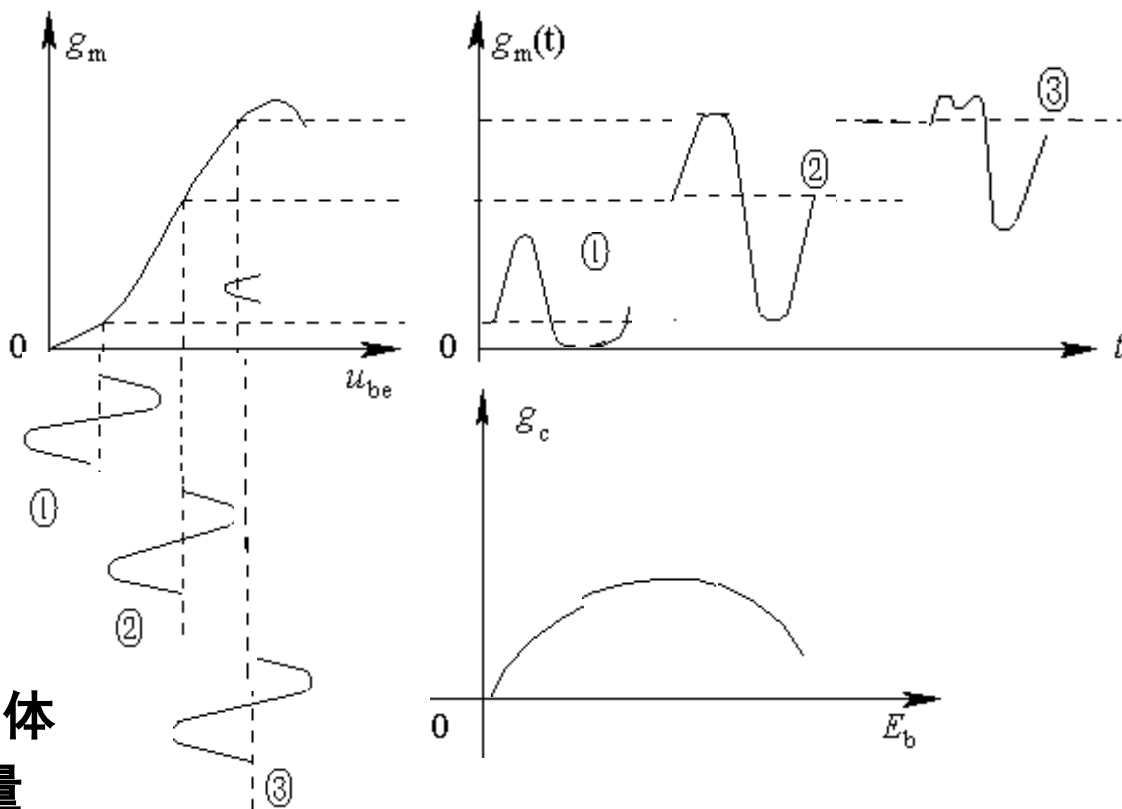
(2) 变频跨导

$g_c \sim U_{BB}$ 的关系：

➤ 当 U_L 固定不变，当 U_{BB} 值较小时， g_m 的基波分量也小，所以 g_c 基本上线性的增加

➤ 当 U_{BB} 较大时，进入晶体管的非线性段，基波分量仍有增加，但变化缓慢。

➤ 当 U_{BB} 过大时，由于 g_m 曲线的下降，使 g_c 也有所下降。





6.3 混频

二、混频电路

1. 晶体三极管混频器

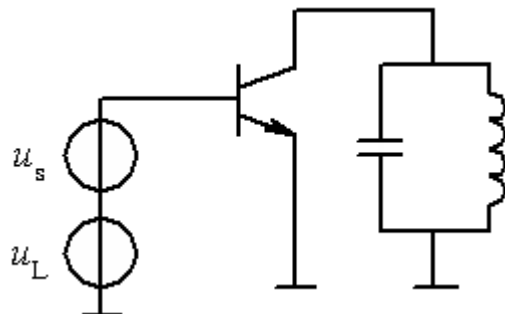
(3) 实际线路

特点：

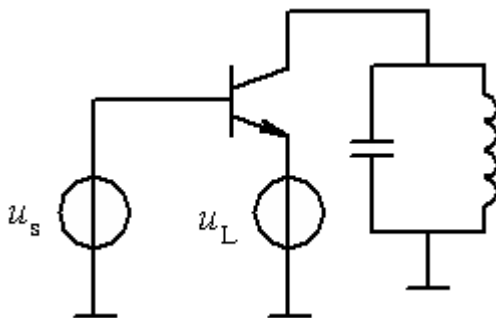
1. 输入输出回路不同频， f_s 可调， f_L 固定
2. 两个注入信号 (u_s , u_L)，要保证都加上互不影响。

注入方式：

1. 基极串馈（同极注入）
2. 基极并馈（同极注入）
3. 射极串馈

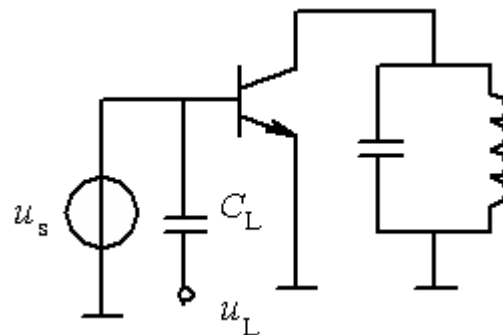


基极串馈



射极串馈

对于本振信号，晶体管共基组态，输入电阻小，因此要求本振注入功率较大



基极并馈

C_L 既不能过大，也不能过小，过大， u_s 、 u_L 相互影响，过小时， u_L 不能有效地加到基极。



6.3 混频

二、混频电路

1. 晶体三极管混频器

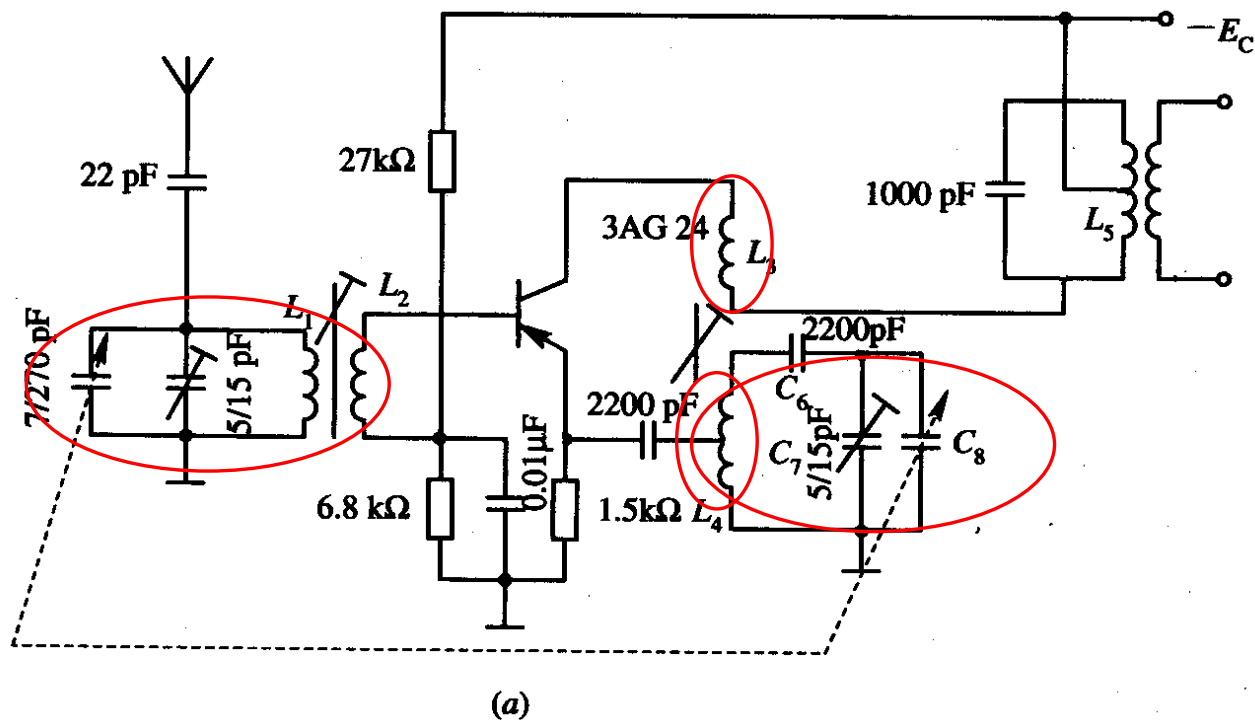
(3) 实际线路

输入信号和本振信号分别加到基极和射极

L3、L4 组成变压器反馈振荡器。

L3 对中频阻抗很小，不影响中频输出电压。

输出中频回路，对本振频率来说阻抗也很小，不影响振荡器的工作



中波 AM 收音机的变频电路



6.3 混频

二、混频电路

2. 二极管混频器

高质量通信设备中以及工作频率较高时，常使用二极管平衡混频器或环形混频器。

其优点是噪声低、电路简单、组合分量少。



6.3 混频

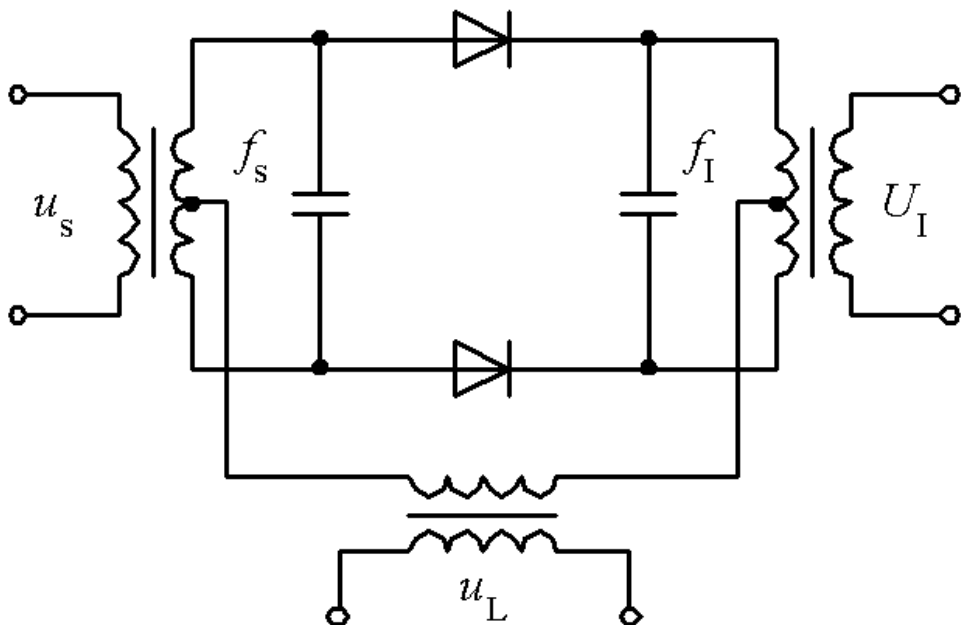
二、混频电路

2. 二极管混频器

(1) 平衡混频器

输入信号 u_s 为已调信号；本振电压为 u_L , $U_L \gg U_s$, 大信号工作, 由第5章可得输出电流 i_o 为

$$\begin{aligned}
 i_o &= 2g_D K(\omega_L t) u_s \\
 &= 2g_D \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega_L t + \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_L t + \text{?} \right) u_s \cos \omega_c t
 \end{aligned}$$





6.3

混频

二、混频电路

2. 二极管混频器

(1) 平衡混频器

$$i_o = 2g_D \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega_L t + \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_L t + \dots \right) U_s \cos \omega_c t$$

输出端接中频滤波器，则输出中频电压 u_I

为

$$u_I = R_L i_I = \frac{2}{\pi} R_L g_D U_s \cos(\omega_L - \omega_s)t = U_I \cos \omega_I t$$



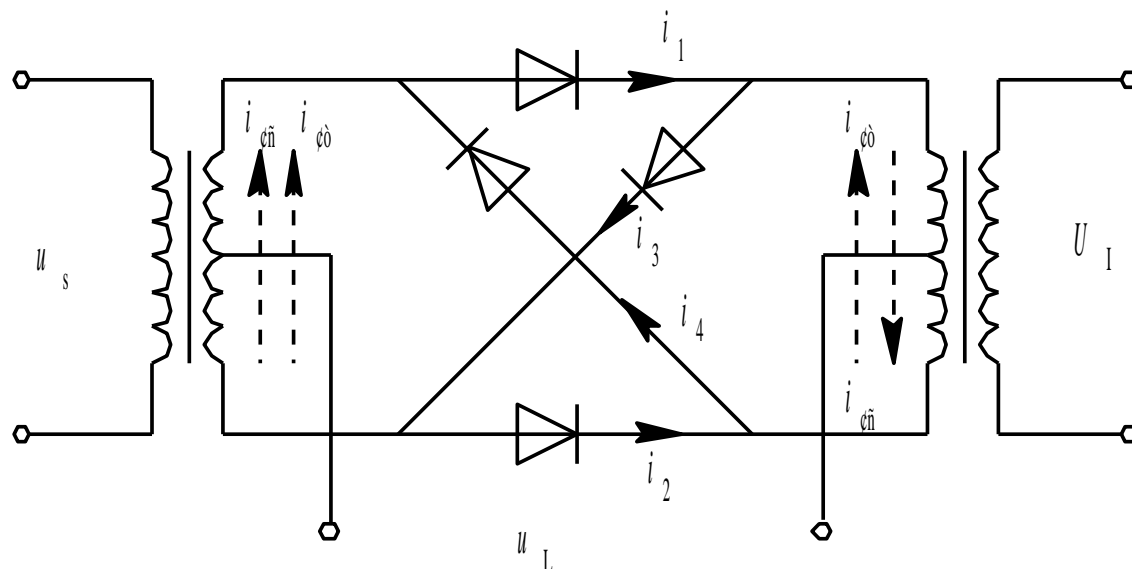
6.3 混频

二、混频电路

2. 二极管混频器

(2) 环形混频器

由第五章可知：



$$i_o = 2g_D K[\omega_L t] u_s$$

$$= 2g_D \left(\frac{4}{\pi} \cos \omega_L t - \frac{4}{3\pi} \cos 3\omega_L t + \text{?} \text{?} \text{?} s \omega_c t \right)$$

$$\text{中频滤波后: } u_I = \frac{4}{\pi} g_D U_S \cos(\omega_L - \omega_c)t = U_I \cos \omega_I t$$

特点：相对其它混频电路没有增益；但是动态范围大，线性好，工作频率高，应用仍然很广泛



6.3

混频

二、混频电路

2. 二极管混频器

(3) 其他混频电路

其他混频电路有：差分对混频器；场效应管混频器。他们都是频谱的线性搬移电路。

混频器的实质就是找到信号的乘积项，然后利用中频滤波器取出所需频率分量，分析方法与第五章相同。