



第八章 角度调制与解调

8.1 调角波的基本性质

8.2 调频信号通过非线性电路

8.3 调频信号通过线性网络

8.4 调频波的产生

8.5 鉴频

8.5 鉴频



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

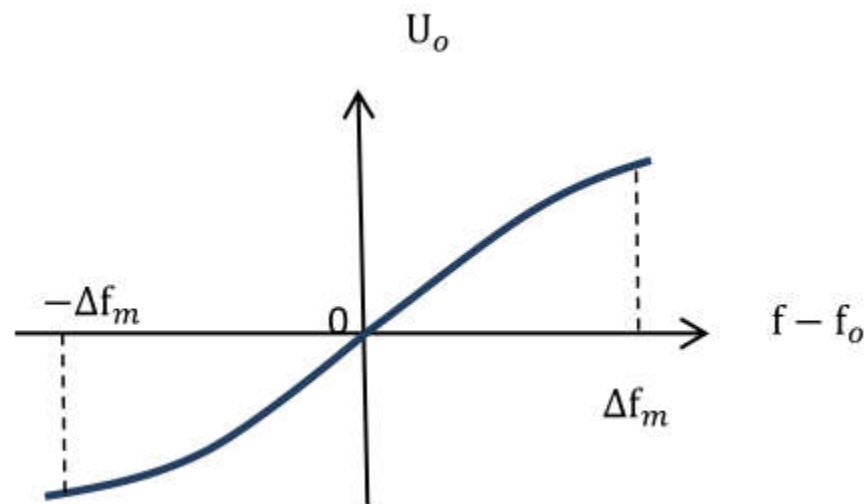
鉴频：对调频波的解调。将调频波的频率变化规律（也即调制信号）变换为输出电压。理想的调频波应该是等幅的，对于带有寄生调幅或幅度收到干扰的调频波，在鉴频器前一般都有加限幅器，用以消除调频波的寄生幅度，提高鉴频器输出的信噪比。

调频只有载波频率的变化，没有幅度的变化，如果用调幅检波一样的方式检波，得到的只有一个直流(U_{FM})检不出调制信号。

对调频波的检波必须先将频率的变化转变成与音频调制信号相应的幅度变化，或者变换占空系数不同的脉冲序列，再经过幅度检波或者脉冲的整流，才能检出音频信号。

频率 (f) - 电压 ($s(t)$)
变换电路

鉴频电路的种类很多，其工作原理大致可以分为以下四种：斜率鉴频，正交鉴频（相位鉴频），脉冲计数式鉴频，锁相鉴频。



8.5 鉴频



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

鉴频器的主要性能指标

① 鉴频器的中心频率

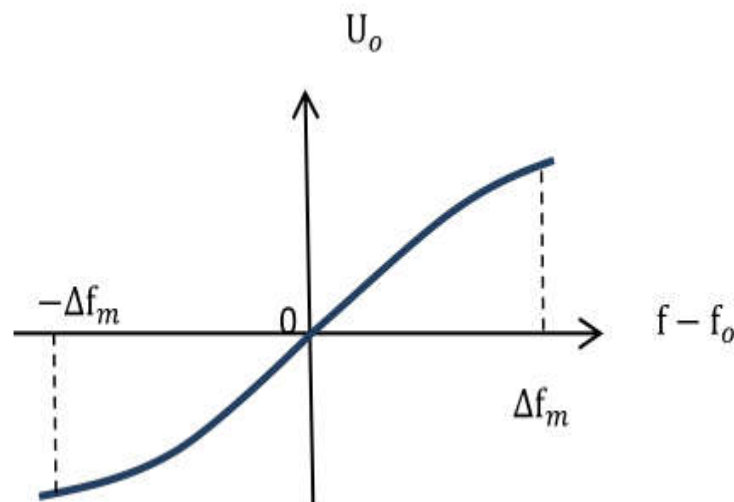
在接收机中，鉴频器位于中频放大器之后，鉴频器的中心频率必须与其中频数值一致，即混频后的中频。

② 鉴频器灵敏度

表示鉴频器将输入信号的频率变化转换为电压的能力，定义为在中心频率 f_0 处，电压增量与频率变化量之比。

③ 鉴频特性线性度

为了不失真的解调，鉴频特性曲线在一定范围内必须呈现线性。



$$k = \left. \frac{du_0(t)}{df} \right|_{f=f_0}$$

④ 线性鉴频范围 $2\Delta f_m$

鉴频器能够不失真解调所允许的输入信号频率变化的最大范围，也称为鉴频器的带宽，要求大于输入调频波最大频偏的两倍。

8.5 鉴频



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

8.5.1 斜率鉴频器

1. 鉴频原理

等幅调频波通过一线性网络，将其频率变化规律转移到幅度变化上，输出FM-AM（调幅调频波），再用包络检波器检出其幅度变化，从而实现鉴频。应用于鉴频范围较大的场合。



限幅器去除调频波在传输过程中由于种种原因（如放大，混频以及通过各种线性网络等）而产生的寄生调幅。

8.5 鉴频



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

① FM→AM变换 用微分器实现



$$u_a = A(t) \cos[\omega_0 t + \Delta\omega \int_0^t s(\tau) d\tau]$$

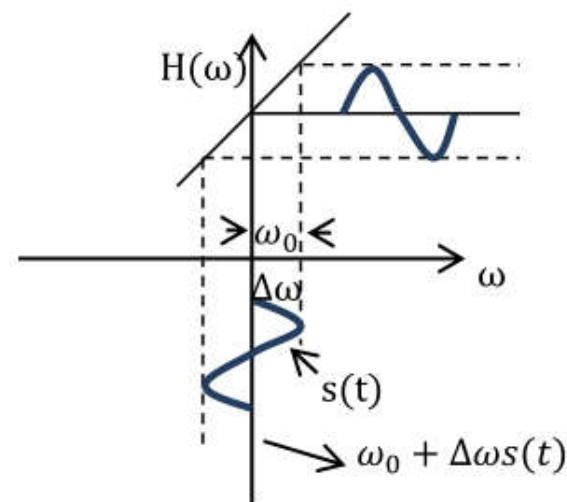
$$u_b = A \cos[\omega_0 t + \Delta\omega \int_0^t s(\tau) d\tau]$$

$$u_c = -A[\omega_0 + \Delta\omega s(t)] \sin[\omega_0 t + \Delta\omega \int_0^t s(\tau) d\tau]$$

$$u_d \propto [\omega_0 + \Delta\omega s(t)] \quad \text{检波器的输出与基带信号成线性关系}$$

② FM→AM变换 用线性网络的 幅频特性来实现

若输入为等幅 FM 波，则输出波形的幅度与频率的变化呈线性变化关系，为 FM-AM 波。



8.5 鉴频



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

2. 单失谐回路斜率鉴频电路

(1) 失谐回路: L_1, C_1

① 谐振回路的中心频率 ω_α 与输入调频波的 ω_0 不相等, 处于回路幅频特性斜率特性较好段的中点。

② 等幅调频波 u_{FM} 经失谐回路耦合后, 完成FM到FM-AM的变换, 得到作为包络检波器的输入 u_1 。

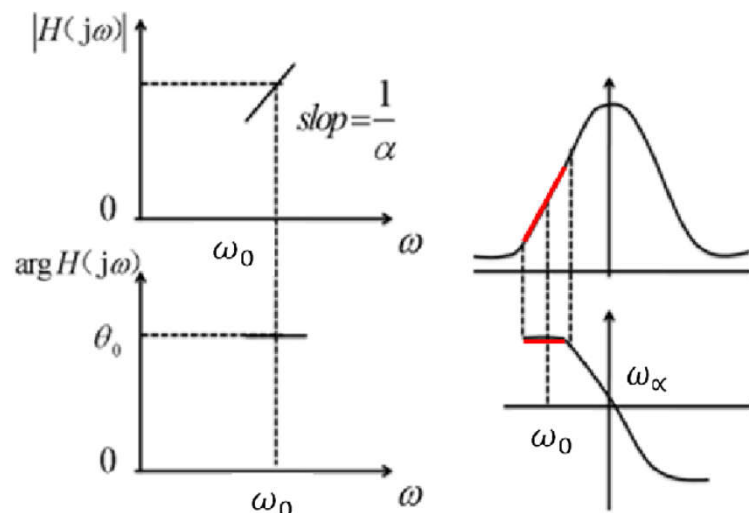
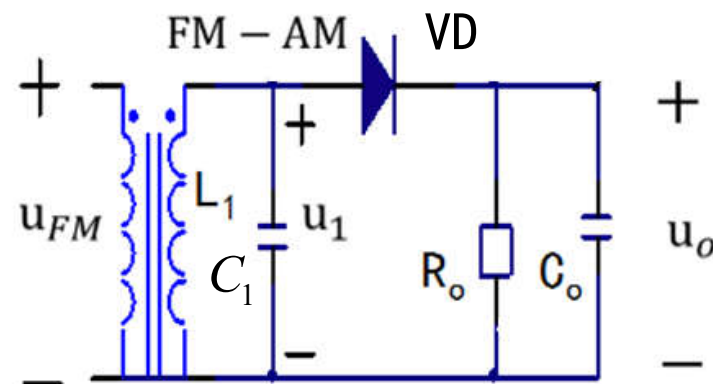
$$U_1 = b(t) = U_{FM} \left(k + \frac{\omega - \omega_0}{\alpha} \right) = U_{FM} \left(k + \frac{\Delta\omega s(t)}{\alpha} \right)$$

(2) 峰值包络检波器: VD, R_o , C_o

k_d - 包络检波增益

$$u_o = k_d U_1$$

线性鉴频



缺点: 失谐回路的斜边非严格线性, 难以做到不失真鉴频, 且其允许频率变化的范围也很小 (即鉴频器的带宽很窄), 灵敏度也不理想。实际上常采用两个单失谐回路构成的双失谐平衡电路。

8.5 鉴频

3. 双失谐回路斜率鉴频电路

两个回路分别失谐于载频 ω_0 的左右两边：

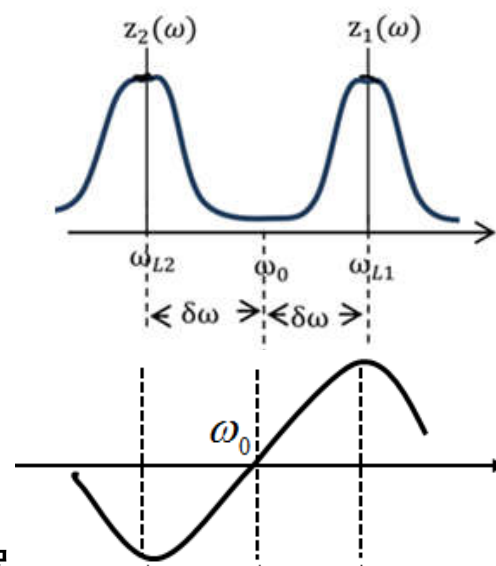
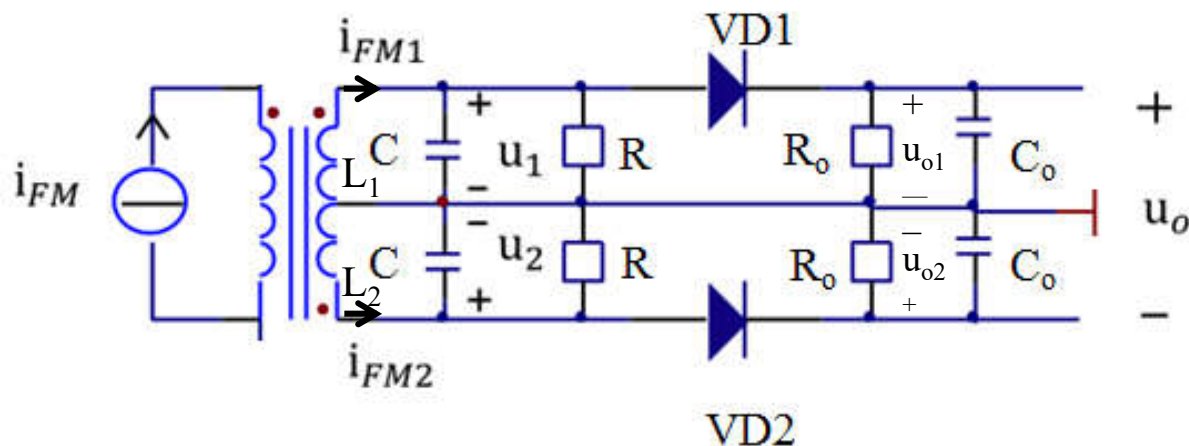
失谐回路1： L_1RC ，调谐于 $\omega_0 + \delta\omega$ ；

失谐回路2： L_2RC ，调谐于 $\omega_0 - \delta\omega$ 上。

按图示同名端关系，两个回路分别受大小相等，相位相反的电流感励。

VD1 (VD2)、 R_o 、 C_o 组成峰值包络检波器

调频波频率变化范围远远小于滤波器带宽，且满足准静态条件下：



可改善鉴频器线性度，扩大带宽。

两个调谐回路互相影响，需要反复多次调节两个回路的中心频率，才能得到好的鉴频特性。因此已基本不使用。

$$U_1 = I|z_1(\omega)| \quad U_2 = I|z_2(\omega)|$$

$$u_o = u_{o1} - u_{o2} = k(U_1 - U_2)$$

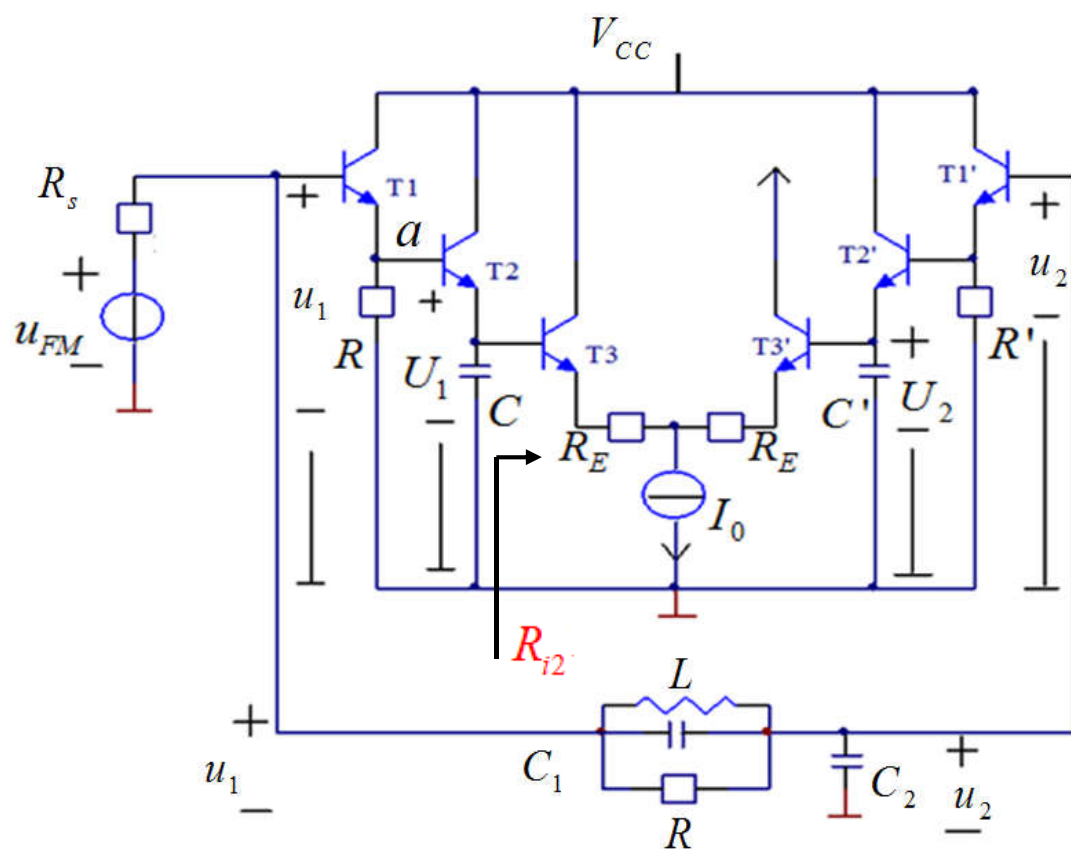
8.5 鉴频



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

4. 差分峰值鉴频电路

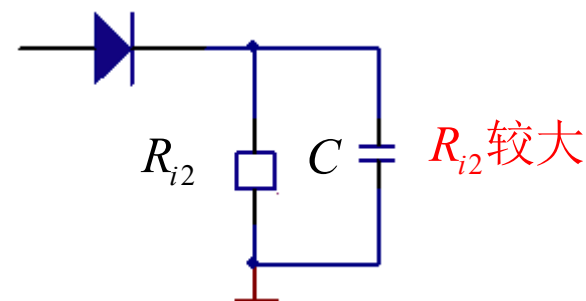
专用模块化组件来实现FM-AM变换，广泛应用于现代调频接收机或电视机的伴音通讯中。



(1) $T_1, R; T_1', R'$ 构成射极跟随器。

(2) $T_2, C; T_2', C'$ 构成峰值包络检波器。分别检出 u_1, u_2 的幅度 U_1, U_2 。

从a看，等效电路如下：

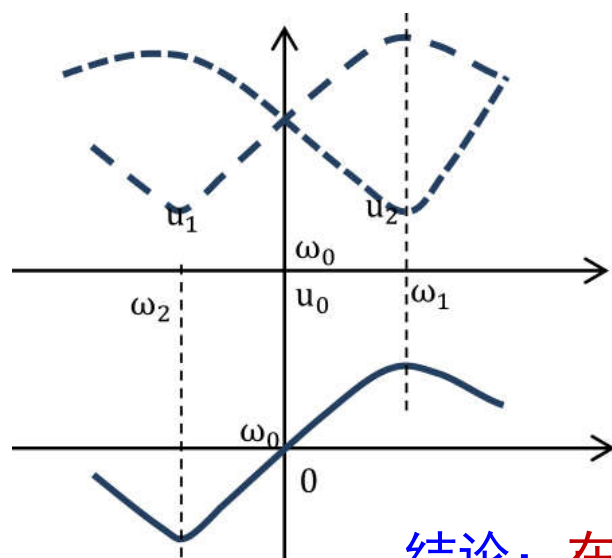
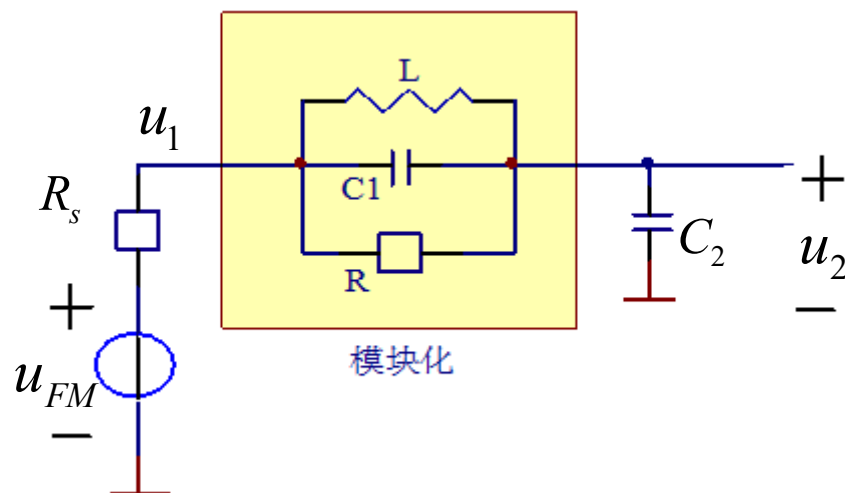


(3) 差分电路 T_3, T_3', R_E, R_E 输出电流 (T_3' 的集电极电流) 正比于 $U_1 - U_2$ 。

8.5 鉴频



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China



(4) u_1 , u_2 由 u_{FM} 经 R_s 、 L 、 C_1 、 R 并联回路和 C_2 分压而得，分压电路如图所示。

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC_1}} \quad \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L(C_1 + C_2)}}$$

① $\omega = \omega_1$: L 、 C_1 发生并联谐振，支路等效阻抗最大， u_1 达到最大值，流过回路的电流最小， u_2 达到最小值。

② $\omega \rightarrow \omega_2$: L 、 C_1 、 R 回路呈感性。 u_1 减小， u_2 增大。

③ $\omega = \omega_2$: L 、 C_1 、 R 与 C_2 发生串联谐振。串联谐振支路的阻抗最小，而流过串联谐振支路的电流达到最大， u_1 最小， u_2 达到最大值。

结论：在 $\omega_2 \rightarrow \omega_1$ 区段内， u_1 由小逐渐变大，而 u_2 由大逐渐变小，鉴频器的输出正比于 $(u_1 - u_2)$ ，鉴频特性如图所示。

8.5 鉴频



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

差分峰值鉴频电路在任一调频接收机中都能看到（现成芯片），电路中 C_2 主要影响鉴频特性的对称性， C_1 或 L 主要影响中心频率，实际电路中，一般固定两只电容，只调节电感，调到中心频率时候输出为0为止。

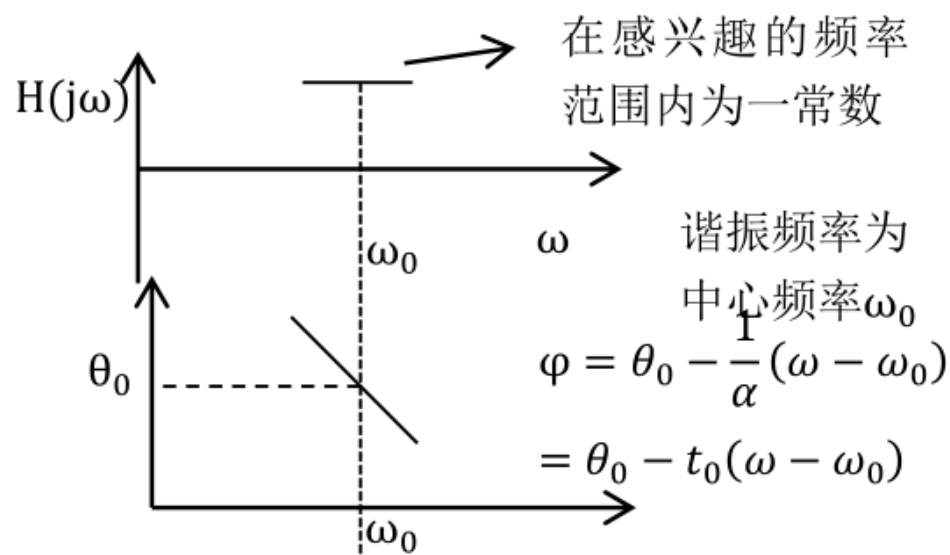
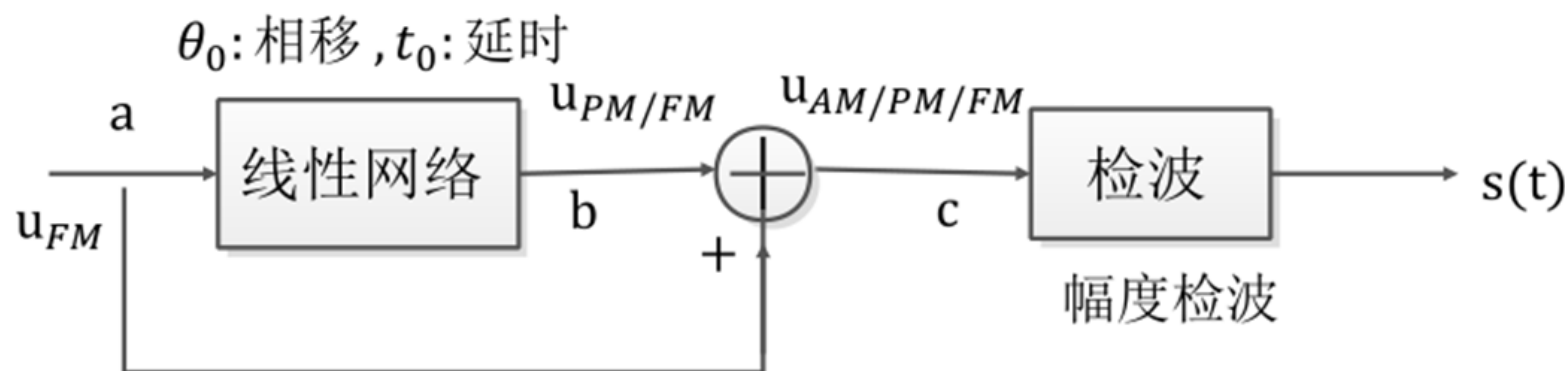
8.5 鉴频



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

8.5.2 叠加型相位鉴频器

1、基本原理



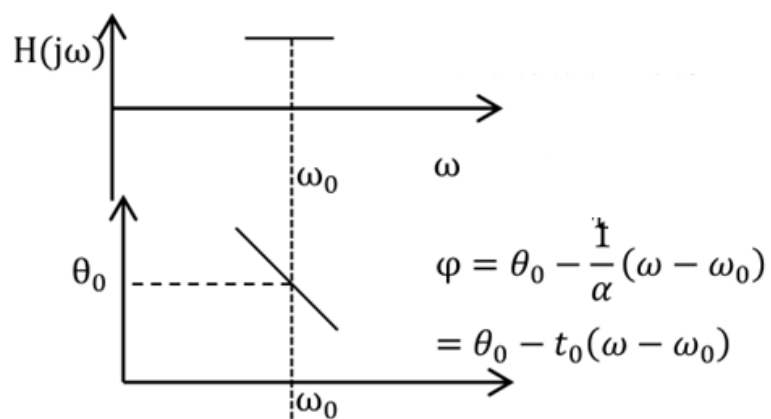
利用具有图示幅频特性和相频特性的线性网络将 u_{FM} 转换成 $u_{PM/FM}$ ，再与原始调频信号 u_{FM} 相叠加，在电路参数与信号参数匹配的条件下，可得到幅度与基带信号成线性关系的 $u_{FM/PM/AM}$ 波。

8.5 鉴频



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

积分中值定理 $\int_a^b f(x)dx = (b-a)f(\varepsilon) \Rightarrow \Delta\omega \int_{t-t_0}^t s(\tau)d\tau = t_0\Delta\omega s(t)$



$$u_{FM} = U \cos \left[\omega_o t + \Delta\omega \int_0^t s(\tau) d\tau \right]$$

$$\omega = \omega_o + \Delta\omega s(t)$$

通过此网络后：

$$\begin{aligned} u_o &= U \cos \left[\omega_o t + \Delta\omega \int_0^t s(\tau) d\tau + \theta_0 - t_0(\omega - \omega_o) \right] \\ &= U \cos \left[\omega_o t + \Delta\omega \int_0^t s(\tau) d\tau + \theta_0 - t_0 \Delta\omega s(t) \right] \\ &= U \cos \left[\omega_o t + \Delta\omega \int_0^{t-t_0} s(\tau) d\tau + \Delta\omega \int_{t-t_0}^t s(\tau) d\tau + \theta_0 - t_0 \Delta\omega s(t) \right] \\ &= U \cos \left[\omega_o t + \Delta\omega \int_0^{t-t_0} s(\tau) d\tau + \theta_0 \right] \end{aligned}$$

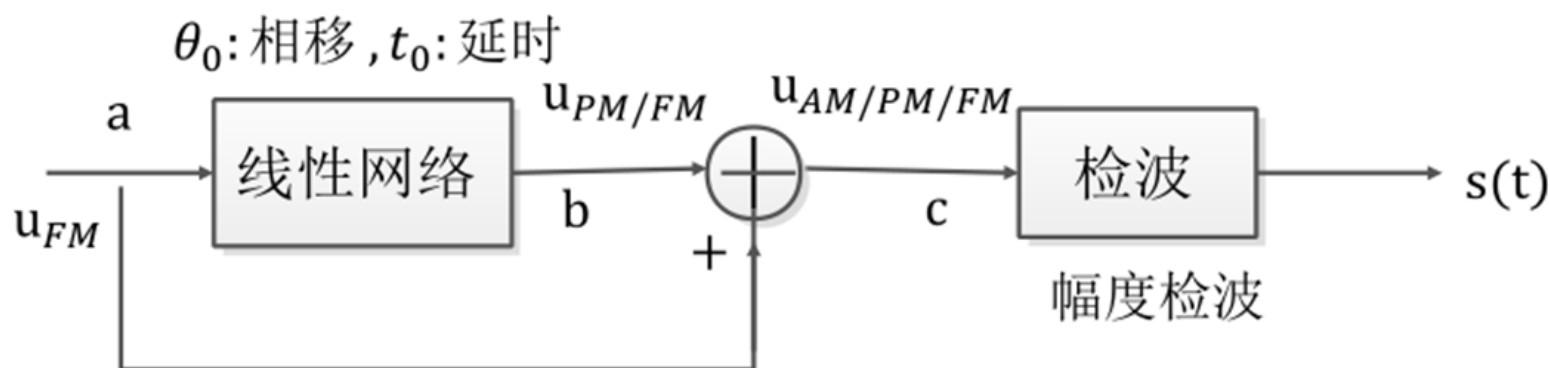
θ_0 : 相移

t_0 : 延时

8.5 鉴频



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China



$$u_{FM} = U \cos \left[\omega_0 t + \Delta \omega \int_0^t s(\tau) d\tau \right]$$

$$u_b = U \cos \left[\omega_0 t + \Delta \omega \int_0^{t-t_0} s(\tau) d\tau + \theta_0 \right] \quad \text{— } u_{PM/FM}$$

$$u_c = u_a - u_b = U \cos \left[\omega_0 t + \Delta \omega \int_0^t s(\tau) d\tau \right] - U \cos \left[\omega_0 t + \Delta \omega \int_0^{t-t_0} s(\tau) d\tau + \theta_0 \right]$$

$$= \underbrace{-2U \sin \frac{1}{2} \left[\Delta \omega \int_{t-t_0}^t s(\tau) d\tau - \theta_0 \right]}_{b(t) \text{ 高频波包络}} \times \underbrace{\sin \left\{ \omega_0 t + \Delta \omega \int_0^t s(\tau) d\tau - \frac{1}{2} \left[\Delta \omega \int_{t-t_0}^t s(\tau) d\tau - \theta_0 \right] \right\}}_{\text{高频波}}$$

$b(t)$ 高频波包络

高频波

8.5 鉴频



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

积分中值定理 $\int_a^b f(x)dx = (b-a)f(\varepsilon)$

$$b(t) = 2U \sin \frac{1}{2} \left[\Delta\omega \int_{t-t_0}^t s(\tau) d\tau - \theta_0 \right]$$

根据积分中值定理
取 $\varepsilon = t - \frac{t_0}{2}$ $\xrightarrow{\quad}$ $2U \sin \frac{1}{2} \left[\Delta\omega \times t_0 \times s\left(t - \frac{t_0}{2}\right) - \theta_0 \right]$

令 $\theta = \Delta\omega \times t_0 \times s\left(t - \frac{t_0}{2}\right)$ 若 θ 足够小 (< 0.2)，则近似有

$$\begin{aligned} b(t) &= 2U \left[\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} - \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta_0}{2} \right] \approx U\theta \cos \frac{\theta_0}{2} - 2U \sin \frac{\theta_0}{2} \\ &= U \times \Delta\omega \times t_0 \times s\left(t - \frac{t_0}{2}\right) \cos \frac{\theta_0}{2} - 2U \sin \frac{\theta_0}{2} \end{aligned}$$

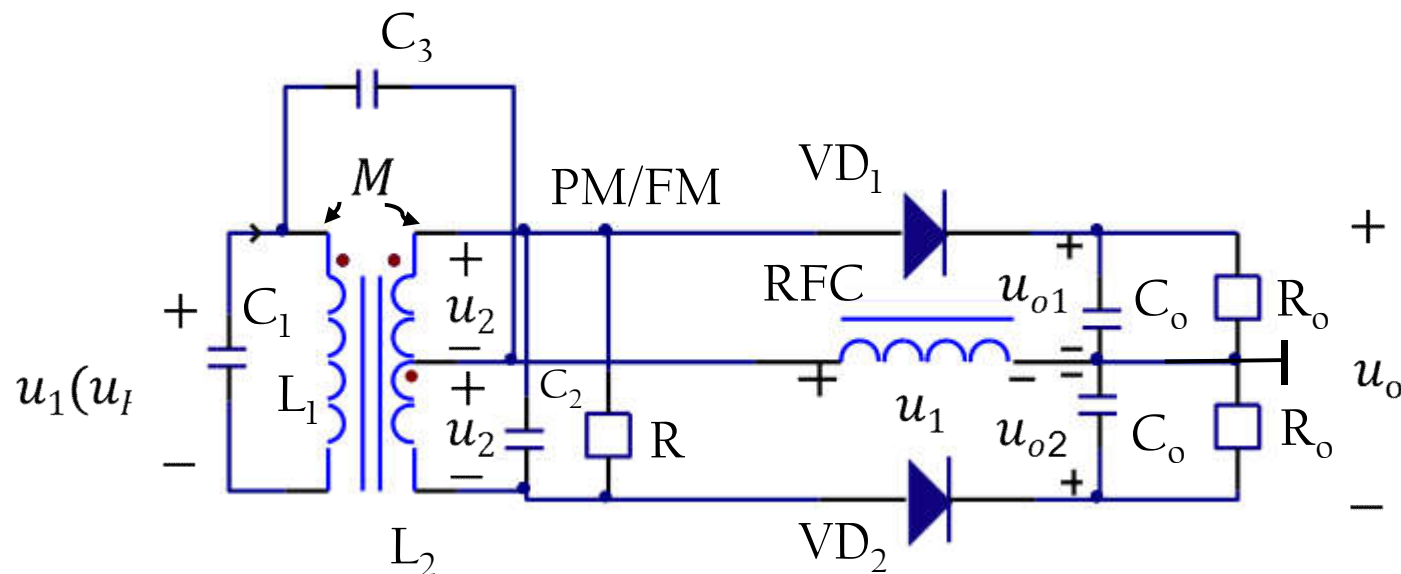
可见包络 $b(t)$ 与 $s(t)$ 成线性关系， $s(t)$ 略有延迟，使用峰值包络检波器将 $b(t)$ 检出即可解出 $s(t)$ 。

8.5 鉴频



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

2、叠加型相位鉴频器



常用的相位鉴频器有电感耦合相位鉴频器和电容耦合相位鉴频器两种。图示为电感耦合相位鉴频器原理图。

①初级回路 L_1C_1 ，次级回路 L_2C_2 ，均调谐于调频波的中心频率；

② L_2RC_2 将FM波变换成PM/FM波；

③两个回路的耦合途径有二：

— 通过互感 M 耦合。 u_1 通过互感 M 在 L_2C_2 并联回路两端产生电压 $2u_2$ ， L_2 上下半线圈电压各为 u_2 。

— 通过电容 C_3 耦合。 C_3 容量足够大，对高频可视为短路， u_1 直接加到高频扼流圈两端。

8.5 鉴频

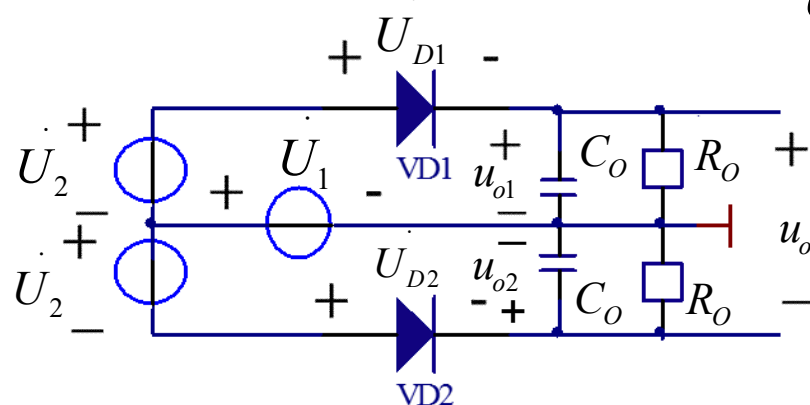


中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

教材中给出了推导过程

简化电路

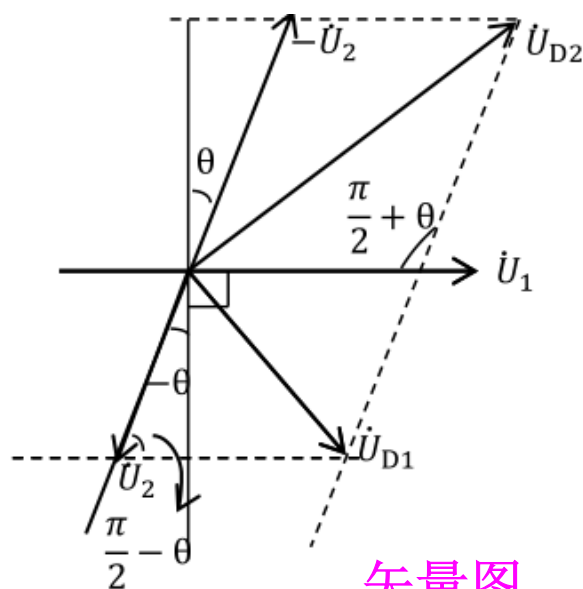


\dot{U}_2 与 \dot{U}_1 有一个几乎与 $s(t)$ 成正比的相移

$$\varphi = -\frac{\pi}{2} - \arctan\left[\frac{\Delta\omega}{\alpha} s(t)\right] \approx -\frac{\pi}{2} - \frac{\Delta\omega}{\alpha} s(t) = -\frac{\pi}{2} - \theta$$

④ VD1、 C_0 、 R_0 (VD2、 C_0 、 R_0) 构成两个对称的幅度检波器。

设 $U_1 = U_2 = U, k_d = 1$



应用
余弦
定理

矢量图

$$\dot{U}_{D1} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 \quad \dot{U}_{D2} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2$$

$$\begin{aligned} U_{D1} &= \sqrt{U^2 + U^2 - 2U^2 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)} \\ &= \sqrt{2}U\sqrt{1 - \sin\theta} = \sqrt{2}U\left(\cos\frac{\theta}{2} - \sin\frac{\theta}{2}\right) \\ U_{D2} &= \sqrt{U^2 + U^2 - 2U^2 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right)} \\ &= \sqrt{2}U\sqrt{1 + \sin\theta} = \sqrt{2}U\left(\cos\frac{\theta}{2} + \sin\frac{\theta}{2}\right) \end{aligned}$$

8.5 鉴频



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

⑤鉴频器输出 $u_o = u_{o1} - u_{o2} = U_{D1} - U_{D2} = -2\sqrt{2}U \sin \frac{\theta}{2}$
 $= -\sqrt{2}U \frac{\Delta\omega}{\alpha} s(t)$ 与s(t)成比例

与斜率鉴频器有两点不同：
①只用到一个谐振回路；
②只有一个固定谐振频率。

缺点：①悬浮输出引起电路不稳定；
②VD1、VD2一个接反不能鉴频；
假设VD1接反： u_{o1} 检出负峰值

$$u_o = -U_{D1} - U_{D2} = -2\sqrt{2}U \cos \frac{\theta}{2} \approx -2\sqrt{2}U$$

不能鉴频

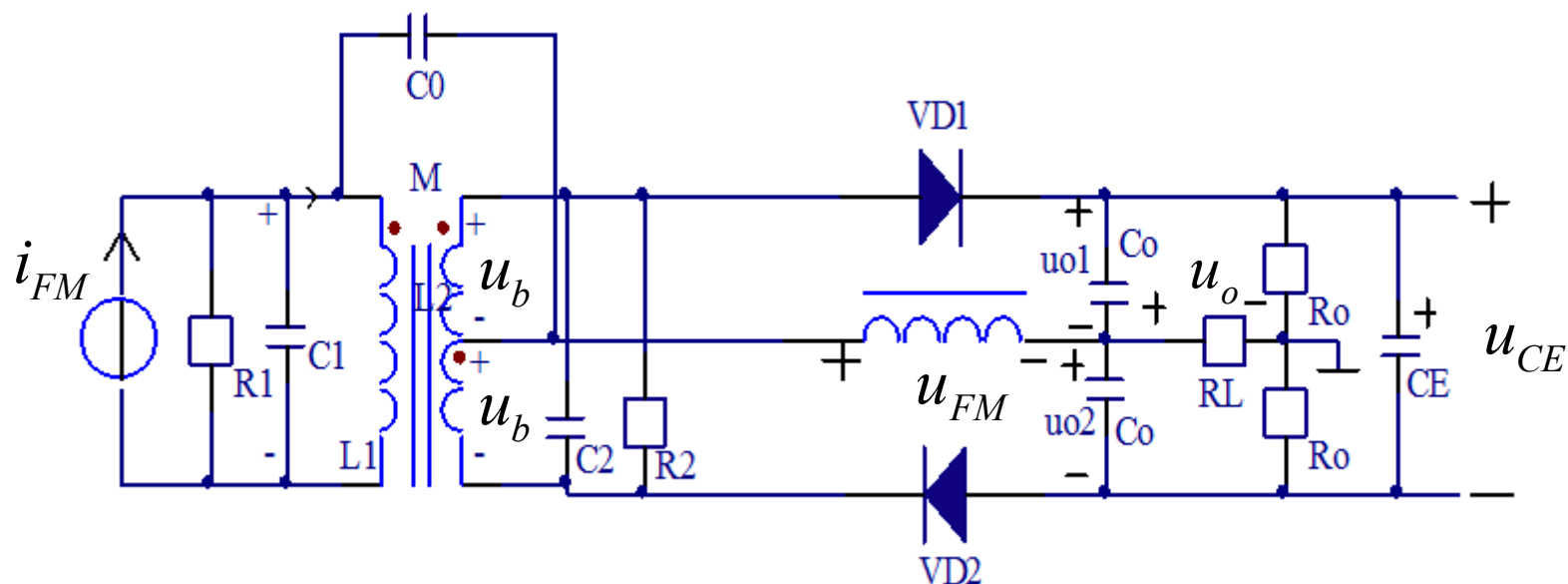
③VD1、VD2若有一个坏了仍然可以鉴频，
但输出中有直流成分。

8.5 鉴频



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

3、比例鉴频器（叠加型的改进或变型电路之一）



比例鉴频器的移相网络与一般相位鉴频器的移相网络完全相同，两者不同的地方有3点：

- ①改变了VD2极性；
- ②改变了输出方式，由悬浮输出改成了对地输出；
- ③在原来的输出端加接了一个大容量电容 CE ，

8.5 鉴频



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

工作原理

$$u_{D1} = u_b + u_{FM} = \sqrt{2}U\sqrt{1 - \sin\theta} = \sqrt{2}U(\cos\frac{\theta}{2} - \sin\frac{\theta}{2})$$

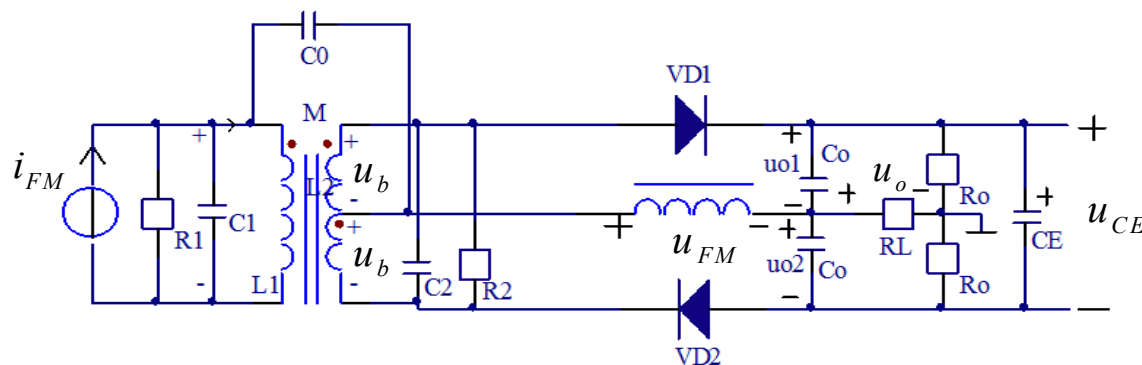
$$u_{D2} = u_b - u_{FM} = \sqrt{2}U\sqrt{1 + \sin\theta} = \sqrt{2}U(\cos\frac{\theta}{2} + \sin\frac{\theta}{2})$$

负向峰值检测

$$u_{CE} = u_{o1} + u_{o2} = 2\sqrt{2}U\cos\frac{\theta}{2} \xrightarrow[\alpha]{\frac{\Delta\omega}{\alpha} \ll 1} 2\sqrt{2}U \quad \text{基本和频率无关}$$

$$u_o = u_{Ro} - u_{o1} = \frac{1}{2}u_{CE} - u_{o1} = \frac{u_{o2} - u_{o1}}{2} \quad \text{为一般相位鉴频器输出的一半}$$

$$\Rightarrow u_o = (u_{o1} + u_{o2}) \frac{u_{o2} - u_{o1}}{2(u_{o1} + u_{o2})} = \sqrt{2}U \frac{1 - \frac{u_{o1}}{u_{o2}}}{1 + \frac{u_{o1}}{u_{o2}}} = \sqrt{2}U \frac{1 - k}{1 + k}$$



8.5 鉴频



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

比例鉴频器的输出与 u_{o1} , u_{o2} 的绝对大小基本无关, 而与它们的比值有关。这种鉴频器在现在有些调频收音机中还能看到。

其最大优点在于它有抑制寄生调幅的作用, $u_{FM} \uparrow \rightarrow u_b \uparrow \rightarrow u_{D1} \uparrow, u_{D2} \uparrow$, 但 $\frac{u_{o1}}{u_{o2}}$ 不变, u_o 不变,

$$u_o = (u_{o1} + u_{o2}) \frac{u_{o2} - u_{o1}}{2(u_{o1} + u_{o2})} = \sqrt{2}U \frac{1 - \frac{u_{o1}}{u_{o2}}}{1 + \frac{u_{o1}}{u_{o2}}} = \sqrt{2}U \frac{1 - k}{1 + k}$$

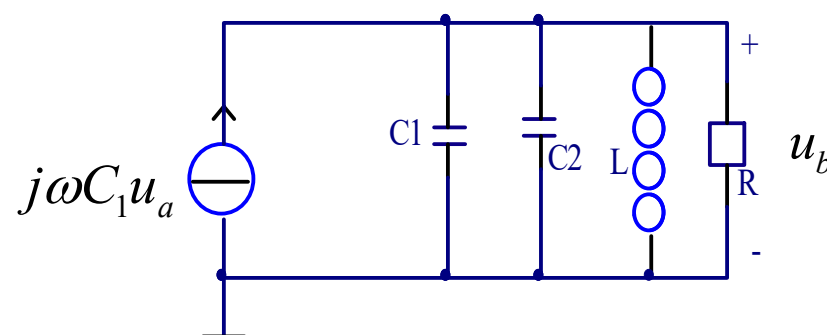
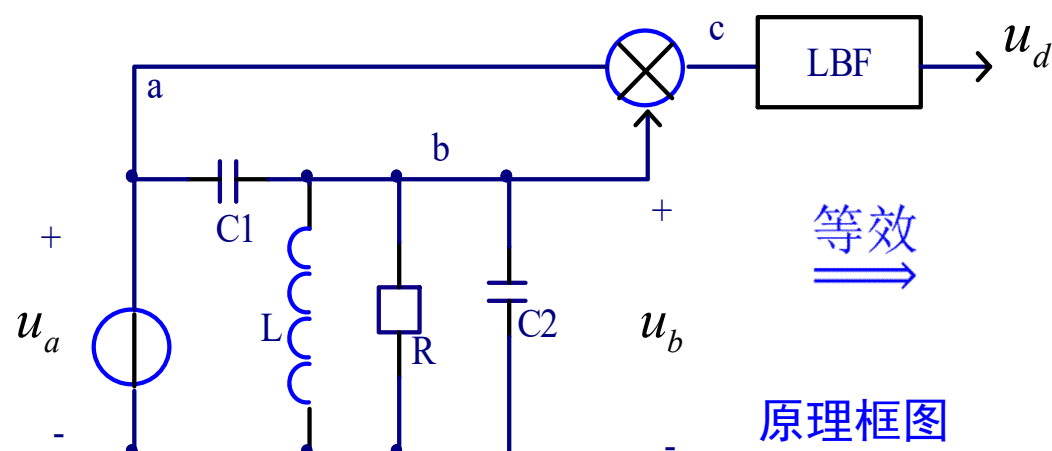
8.5 鉴频



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

8.5.3 利用乘法器的相位鉴频器

C1、R、L、C2组成移相网络



等效

中心频率

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L(C_1 + C_2)}}$$

半带宽

$$\alpha = \frac{1}{2R(C_1 + C_2)}$$

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_b}{\dot{U}_a} = \frac{j\omega C_1 \dot{U}_a Z(j\omega)}{\dot{U}_a} = j\omega C_1 \frac{R}{1 + j \frac{\omega - \omega_0}{\alpha}}$$

电压
传输
函数

$$\left| \frac{\dot{U}_b}{\dot{U}_a} \right| = \frac{\omega R C_1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega - \omega_0}{\alpha} \right)^2}} = \frac{\omega R C_1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\Delta \omega s(t)}{\alpha} \right)^2}} \xrightarrow{\Delta \omega \ll \alpha} \omega_0 R C_1$$

通过选择
参数确定

即 u_a 经线性网络后得到的信号依然是等幅的

8.5 鉴频



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

相移: $\varphi = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{\Delta\omega s(t)}{\alpha} = \frac{\pi}{2} - \theta(t)$ 与音频信号有关系的相位

$$u_a = U \cos \left[\omega_0 t + \Delta\omega \int_0^t s(\tau) d\tau \right] \quad u_b = U \cos \left[\omega_0 t + \Delta\omega \int_0^t s(\tau) d\tau + \frac{\pi}{2} - \theta(t) \right]$$

$$\begin{aligned} u_c = u_a u_b &= \frac{1}{2} U^2 \cos \left[2\omega_0 t + 2\Delta\omega \int_0^t s(\tau) d\tau + \frac{\pi}{2} - \theta(t) \right] + \frac{1}{2} U^2 \cos \left[\frac{\pi}{2} - \theta(t) \right] \\ &= \frac{1}{2} U^2 \cos \left[2\omega_0 t + 2\Delta\omega \int_0^t s(\tau) d\tau + \frac{\pi}{2} - \theta(t) \right] + \frac{1}{2} U^2 \sin \theta(t) \end{aligned}$$

高频

低频

$$\Rightarrow u_d \propto \sin \theta(t) = \sin \left[\operatorname{arctg} \frac{\Delta\omega}{\alpha} s(t) \right] = \frac{\Delta\omega}{\alpha} s(t)$$

这种鉴频电路的特点是使用最简单，在现代调频接收系统中最常用。

上述原理图中，若输入的调频波与移相后的FM-PM波的幅度足够大，以至于超过乘法器的范围，则乘法器工作在开关状态，称为符合门鉴频。

8.5 鉴频



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

- 作业：8.16, 8.17