



第 7 章 角度调制与解调

- 7.1 调频信号分析
- 7.2 调频器与调频方法
- 7.3 调频电路
- 7.4 鉴频器与鉴频方法
- 7.5 鉴频电路

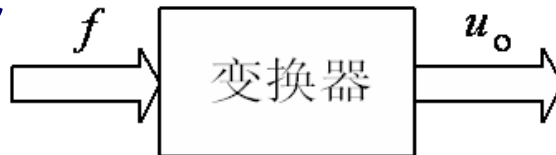


7.4 检频器与检频方法

一、检频器

基本概念：

- ① 角调波的解调就是从角调波中恢复出原调制信号的过程。
- ② 调频波的解调电路称为频率检波器或鉴频器（FD），
调相波的解调电路称为相位检波器或鉴相器（PD）
- ③ 在调频信号的产生、传输和通过调频接收机前端电路的过程总，不可避免地要引入干扰和噪声，干扰和噪声对调频信号的影响主要表现为不希望有的寄生调幅和寄生调频。
- ④ 鉴频器的功能：将输入调频波的瞬时频率 f 或频偏 Δf 变换为相应的解调输出电 u_o





7.4 检频器与检频方法

一、检频器

基本概念：

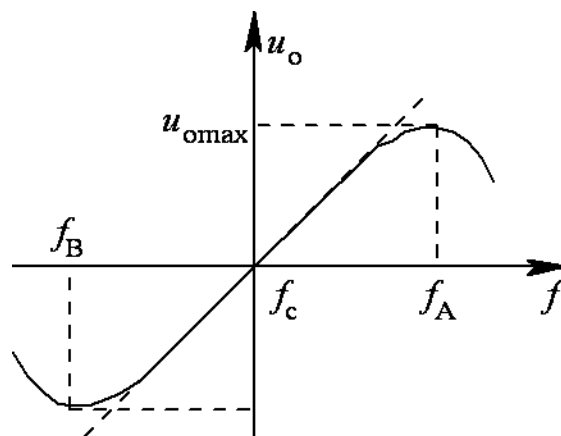
⑤ 鉴频特性曲线——调频波瞬时频率 f 与输出电压 u_o 之间的关系曲线。

⑥ 鉴频器的中心频率 f_0 ——对应于鉴频特性曲线原点处的频率。

⑦ 鉴频带宽 B_m ——能够不失真地解调所允许的输入信号频率变化的最大范围。

上图中，鉴频特性曲线两个最大值对应的频率间隔即为鉴频带宽。

$$B_m = f_A - f_B$$



鉴频特性



7.4 检频器与检频方法

一、检频器

基本概念：

- ⑧ 鉴频跨导 S_D —— 鉴频特性在载频处的斜率，表示单位频偏所能产生的解调输出电压，又叫鉴频灵敏度。

$$S_D = \left. \frac{du_o}{df} \right|_{f=f_c} = \left. \frac{du_o}{d\Delta f} \right|_{\Delta f=0}$$

也可理解为鉴频器将输入频率转换为输出电压的能力或效率。

- ⑨ 门限效应—— 一旦鉴频器输入信噪比低于规定的门限，鉴频器的输出信噪比将急剧下降，这种现象称为门限效应



7.4 检频器与检频方法

二、检频方法

检频方法

- ① 直接鉴频法——直接从调频信号的频率中提取出原来的调制信号的方法。 主要是脉冲计数式鉴频方法。
- ② 间接鉴频法——就是对调频信号进行不同的变换或处理，从而间接地恢复原来调制信号的方法，如波形变换法，正交鉴频法等

就鉴频器的工作原理而言，各种实现方法都是将输入的调频波通过变换电路进行特定的波形变换，使变换后的波形反映瞬时频率变化的平均分量，然后通过低通滤波器取出调制电压。

根据波形变换的不同特点，鉴频方法可分为

振幅鉴频法
相位鉴频法



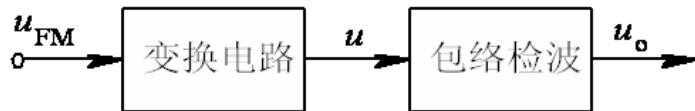
7.4 检频器与检频方法

二、检频方法

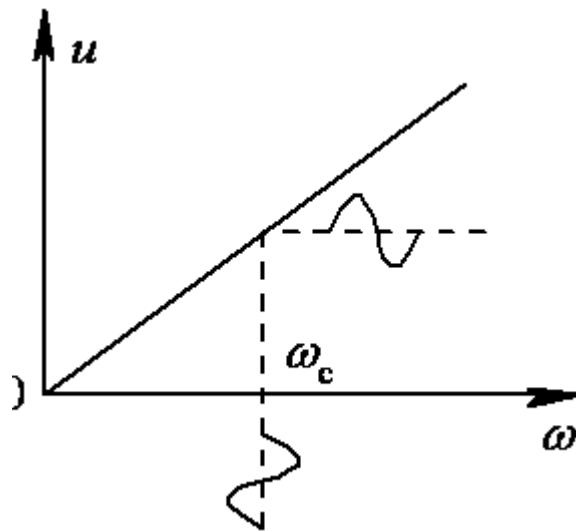
1. 振幅鉴频法

调频波振幅恒定，故无法直接用包络检波器解调。

将等幅的调频信号变换成振幅也随瞬时频率变化、既调频又调幅的 **FM—AM** 波，就可以通过**包络检波器解调**此调频信号。用此原理构成的鉴频器称为**振幅鉴频器**。



振幅鉴频器框图



变换电路特性



7.4 检频器与检频方法

二、检频方法

1. 振幅鉴频法

① 直接时域微分法

设调制信号为 $u_{\Omega}(t) = f(t)$ ，调频波为

$$u_{FM}(t) = U \cos[\omega_c t + k_f \int_0^t f(\tau) d\tau]$$

对此式直接微分可得

$$u = \frac{du_{FM}(t)}{dt} = -U[\omega_c + k_f f(t)] \sin[\omega_c t + k_f \int_0^t f(\tau) d\tau]$$

电压的振幅与瞬时频率 $\omega(t) = \omega_c + k_f f(t)$ 成正比，即 u 是一个 FM-AM 波，对其进行包络检波后即可得到原调制信号。



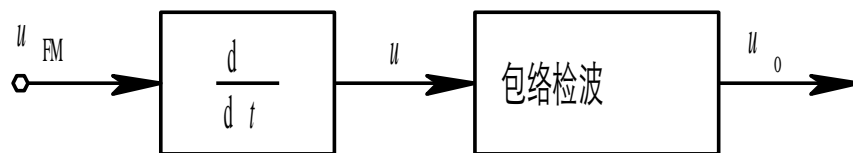
7.4 检频器与检频方法

二、检频方法

1. 振幅鉴频法

① 直接时域微分法

结论：只要将调频波直接进行微分计算，就可以很方便地用包络检波器实现鉴频。



微分鉴频原理

缺点：有效的线性鉴频范围有限

改进措施：采用较为理想的时域微分鉴频器，如脉冲计数式鉴频器



7.4 检频器与检频方法

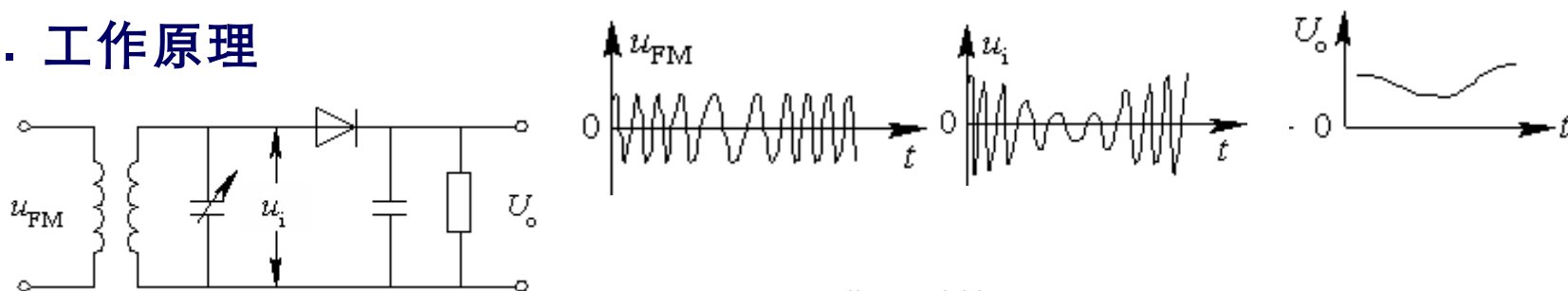
二、检频方法

1. 振幅鉴频法

② 斜率鉴频法

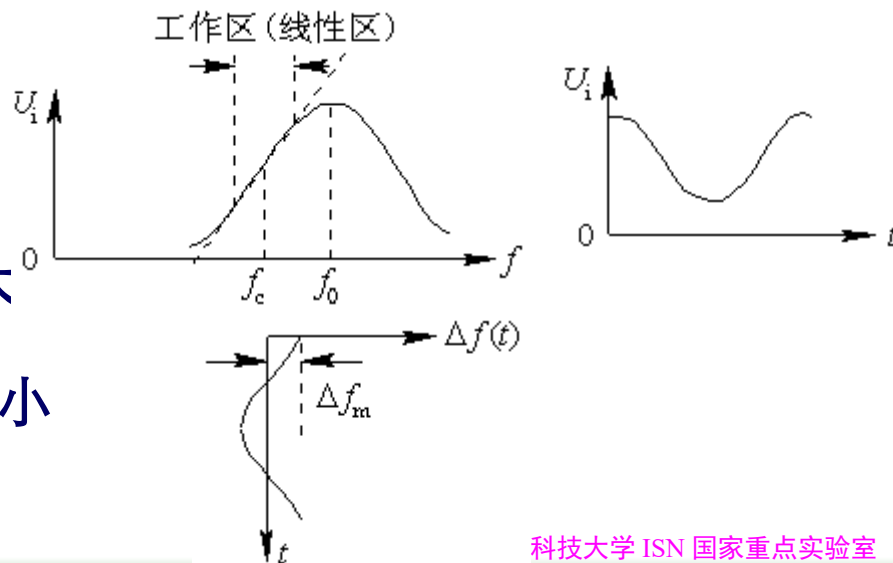
a. 工作原理

利用调谐回路幅频特性的倾斜部分对 FM 波解调的方法称为斜率鉴频法。
由于这种电路中利用的是调谐回路的失谐状态，故也称失谐回路法。



回路的谐振频率 $f_0 >$ 载频 f_c ，
利用的是幅频特性的倾斜部分
当 $f > f_c$ 时，回路两端电压大

当 $f < f_c$ 时，回路两端电压小





7.4 检频器与检频方法

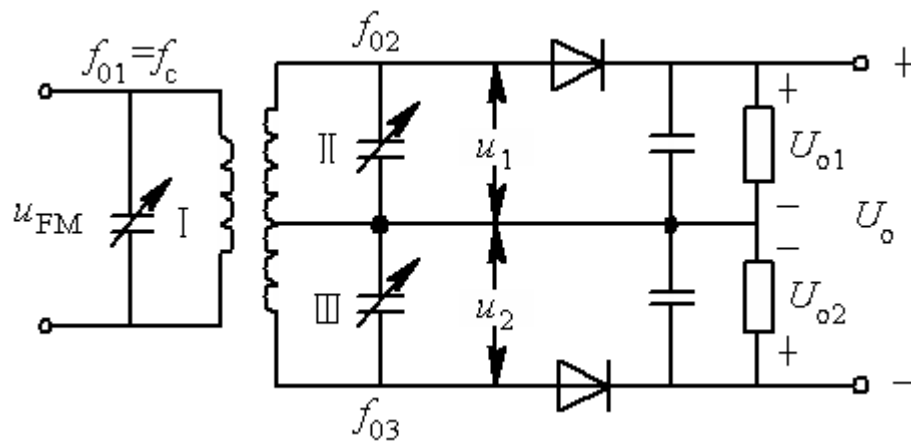
二、检频方法

1. 振幅鉴频法

② 斜率鉴频法

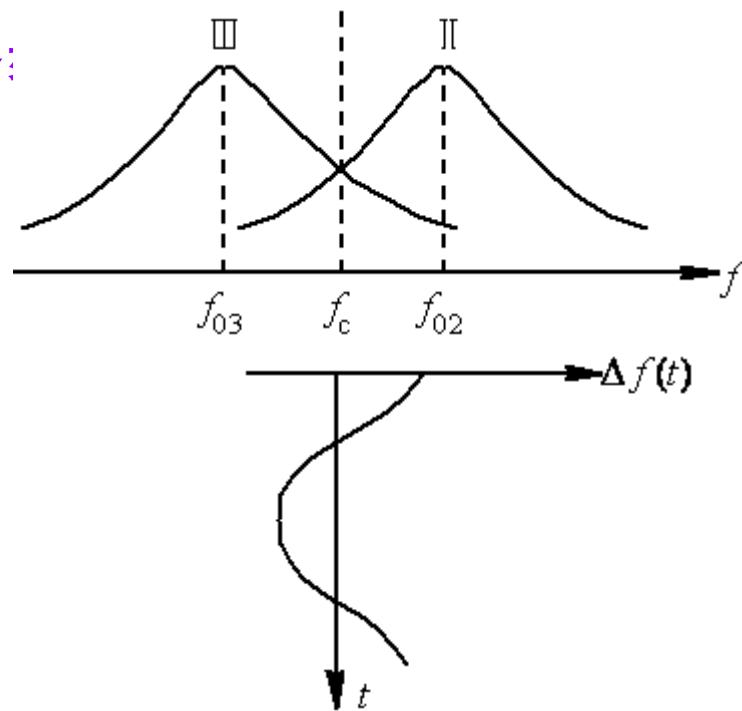
单调谐回路的谐振曲线，其倾斜部分的线性度较差，为了扩大线性范围，实际采用的多是三调谐回路的双离谐平衡鉴频器。

b. 缺点及改进措施——双离谐平衡鉴频器



$$f_{01} = f_c \quad f_{02} > f_c \quad f_{03} < f_c$$

$$f_{01} - f_c = f_c - f_{03}$$





7.4 检频器与检频方法

二、检频方法

1. 振幅鉴频法

② 斜率鉴频法

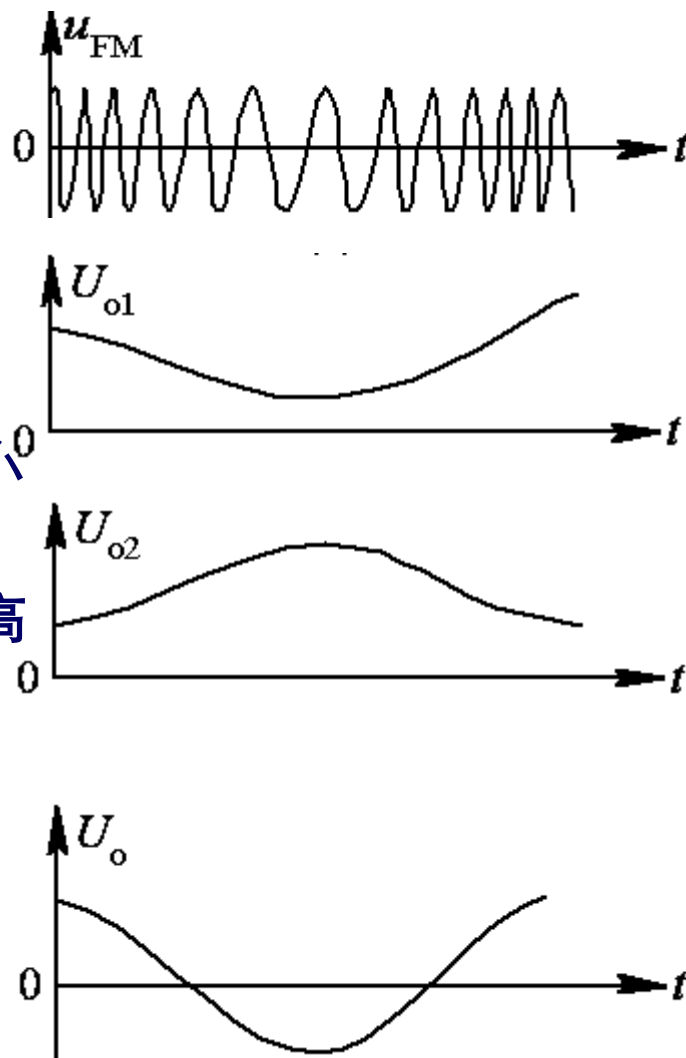
b. 缺点及改进措施——双离谐平衡鉴频

当瞬时频率最高时, U_{o1} 最高, U_{o2} 最小

当瞬时频率最低时, U_{o1} 最小, U_{o2} 最高

双离谐鉴频器的输出是取两个带通响应之差

$$U_o = U_{o1} - U_{o2}$$





7.4 检频器与检频方法

二、检频方法

1. 振幅鉴频法

② 斜率鉴频法

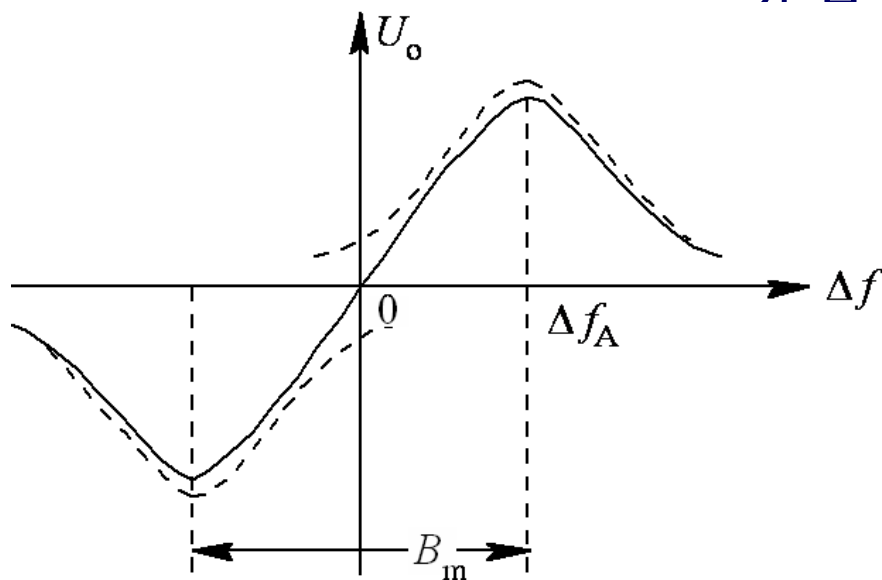
b. 缺点及改进措施——双离谐平衡鉴频器

鉴频特性：

双离谐鉴频器的优点：线性响应好，
失真

较小，灵敏度高于单回路谐振

缺点： 不易调整。





7.4 检频器与检频方法

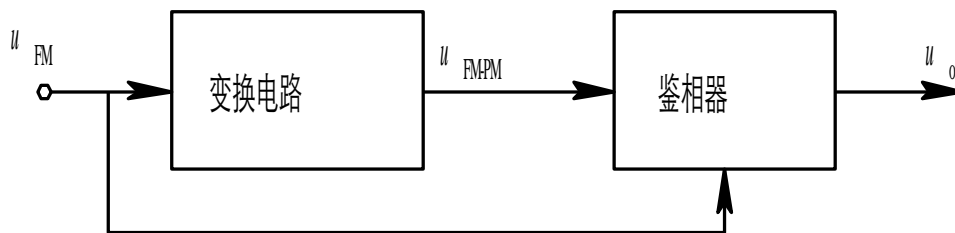
二、检频方法

2. 相位鉴频法

图中的变换电路具有线性的频率—相位转换特性，它可以将等幅的调频信号变成相位也随瞬时频率变化的、既调频又调相的

FM—PM 波。

将 **FM-PM 波** 与原来的 **FM 波** 一起加到鉴相器上，就可以通过鉴相器解调此调频信号。



相位鉴频法的原理框图

相位鉴频法的关键是**相位检波器**。相位检波器或鉴相器就是用来检出两个信号之间的相位差，完成**相位差—电压变换**作用的部件或电路。



7.4 检频器与检频方法

二、检频方法

2. 相位鉴频法

设输入鉴相器的两个信号分别为

$$u_1 = U_1 \cos[\omega_c t + \varphi_1(t)]$$

$$u_2 = U_2 \cos[\omega_c t - \frac{\pi}{2} + \varphi_2(t)] = U_2 \sin[\omega_c t + \varphi_2(t)]$$

同时加于鉴相器，鉴相器的输出电压 u_o 是瞬时相位差的函数，即

$$u_o = f[\varphi_2(t) - \varphi_1(t)]$$

在线性鉴相时， u_o 与相位差 $\varphi(t) = \varphi_2(t) - \varphi_1(t)$ 成正比

鉴 相—— u_1 是输入的调相波， u_2 为参考信号
相位鉴频—— u_1 是调频波， u_2 是 u_1 通过移项网络后的信号



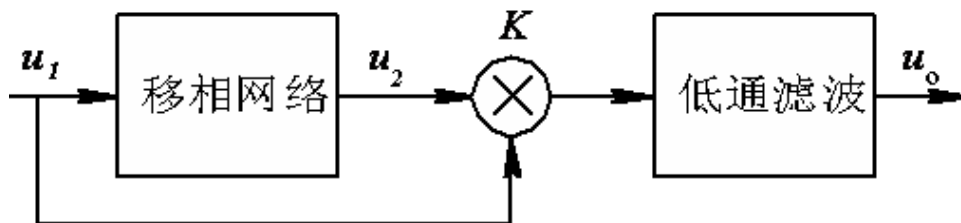
7.4 检频器与检频方法

二、检频方法

2. 相位鉴频法

① 乘积型相位鉴频法

利用乘积型鉴相器实现鉴频的方法称为乘积型相位鉴频法或积分(Quadrature)鉴频法。其中移相网络是往往是单谐振回路或耦合回路。



$$u_1 = U_1 \cos(\omega_c t + m_f \sin \Omega t)$$

$$u_2 = U_2 \cos(\omega_c t + m_f \sin \Omega t + \varphi)$$

其中： $\varphi = \frac{\pi}{2} - \arctan(2 \frac{Q_0 \Delta f}{f_0})$ (参考第二章谐振回路的内容)

f_0, Q_0 是谐振回路的谐振频率和品质因数， $\frac{\pi}{2}$ 是引入的固定相移



7.4 检频器与检频方法

二、检频方法

2. 相位鉴频法

① 乘积型相位鉴频法

$$u_1 = U_1 \cos(\omega_c t + m_f \sin \Omega t)$$

$$u_2 = U_2 \cos(\omega_c t + m_f \sin \Omega t + \varphi)$$

设乘法器的乘积因子为 K ，则经过相乘器和低通滤波器后的输出电压为

$$u_o = \frac{K}{2} U_1 U_2 \sin(\arctan \frac{2Q_0 \Delta f}{f_0})$$

$$\text{当 } \frac{\Delta f}{f_0} \ll 1 \quad \text{时,} \quad u_o = K U_1 U_2 \frac{Q_0 \Delta f}{f_0}$$

因此鉴相器的输出与输入信号的频偏成正比。

引入固定相移 $\frac{\pi}{2}$ 的目的是为了得到一条通过原点的鉴相和鉴频曲线



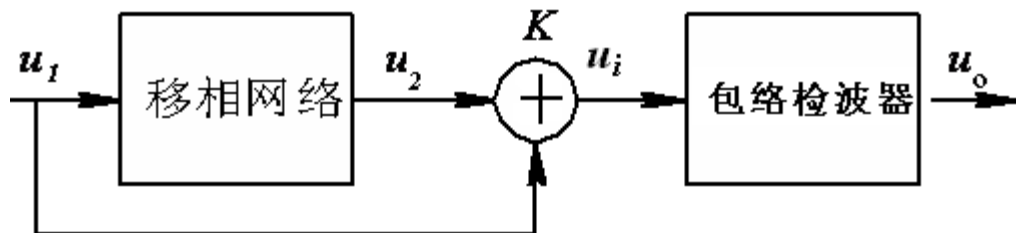
7.4 检频器与检频方法

二、检频方法

2. 相位鉴频法

② 叠加型相位鉴频法

利用叠加型鉴相器实现鉴频的方法称为叠加型相位鉴频法。



$$u_1 = U_1 \cos(\omega_c t + \varphi_1(t))$$

设

$$u_2 = U_2 \cos(\omega_c t + \varphi_2(t))$$

$$\text{则 } u_2 = U_2 \sin(\omega_c t + \varphi_2(t)) = U_2 \sin(\omega_c t + \varphi_1(t) + \varphi_e(t))$$

$$\text{其中 } \varphi_e(t) = \varphi_2(t) - \varphi_1(t)$$

$$\begin{aligned} u_i = u_2 + u_1 &= U_1 \cos(\omega_c t + \varphi_1(t)) + U_2 \sin(\omega_c t + \varphi_1(t)) \square \cos(\varphi_e(t)) \\ &\quad + U_2 \cos(\omega_c t + \varphi_1(t)) \square \sin(\varphi_e(t)) \end{aligned}$$

$$= [U_1 + U_2 \sin(\varphi_e(t))] \cos(\omega_c t + \varphi_1(t)) + U_2 \cos(\varphi_e(t)) \diamond \sin(\omega_c t + \varphi_1(t))$$



7.4 检频器与检频方法

二、检频方法

2. 相位鉴频法

② 叠加型相位鉴频法

叠加型相位鉴频法的基本思想是把两者的相位差的变化转换为合成信号的振幅变化，然后用包络检波器检出其振幅变化，从而达到鉴相的目的。

$$u_i = [U_1 + U_2 \sin(\varphi_e(t))] \cos(\omega_c t + \varphi_1(t)) + U_2 \cos(\varphi_e(t)) \sin(\omega_c t + \varphi_1(t))$$

$$U_i = \sqrt{[U_1 + U_2 \sin(\varphi_e(t))]^2 + [U_2 \cos(\varphi_e(t))]^2}$$

$$= \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \sin(\varphi_e(t))}$$

当 $U_2 \gg U_1$ 时, $U_i = U_1 \sqrt{1 + \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 + 2\frac{U_2}{U_1} \sin(\varphi_e(t))} \approx U_1 \left[1 + \frac{U_2}{U_1} \sin(\varphi_e(t))\right]$

当 $U_2 \ll U_1$ 时, $U_i \approx U_2 \left[1 + \frac{U_1}{U_2} \sin(\varphi_e(t))\right]$

而 $u_o = K_d U_i$

鉴相特性近似为正弦性，若 $\varphi_e(t)$ 很小，则输出 u_o 与 $\varphi_e(t)$ 成线性关系



7.4 检频器与检频方法

二、检频方法

2. 相位鉴频法

② 叠加型相位鉴频法——改进

为了抵消直流项，扩大线性范围，通常采用平衡式电路差动输出，如图

$$u_r' = U_r \sin(\omega_c t)$$

$$u_r = U_r \sin[\omega_c t + \frac{\pi}{2}]$$

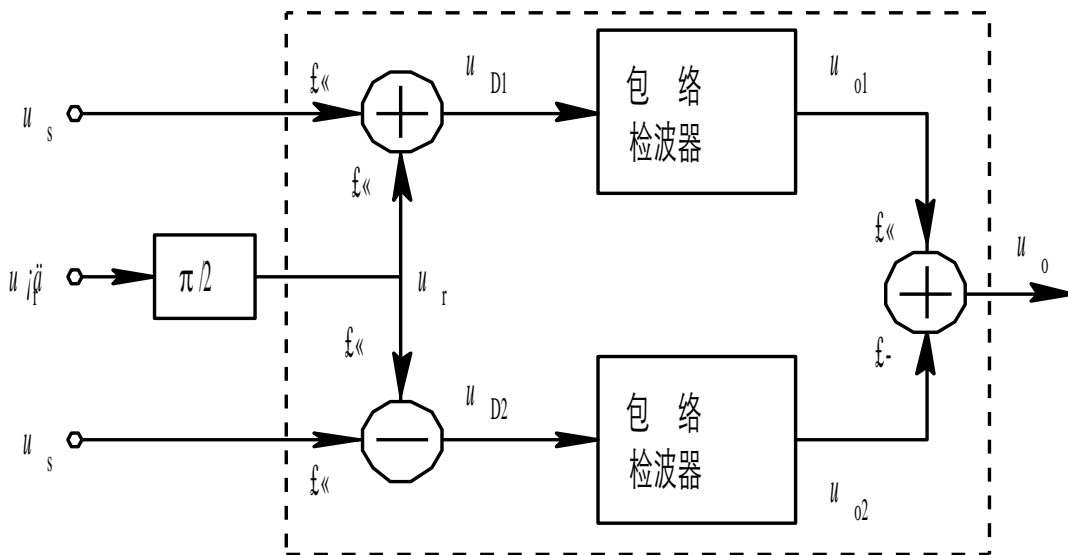
$$u_s = U_s \sin(\omega_c t + \varphi_s(t))$$

$$|u_{D1}| = |u_r + u_s|$$

$$= \sqrt{U_r^2 + U_s^2 + 2U_r U_s \sin \varphi_s(t)}$$

$$|u_{D2}| = |u_r - u_s|$$

$$= \sqrt{U_r^2 + U_s^2 - 2U_r U_s \sin \varphi_s(t)}$$



平衡式叠加型相位鉴频器框图



7.4 检频器与检频方法

二、检频方法

2. 相位鉴频法

② 叠加型相位鉴频法——改进

$$|u_{D1}| = \sqrt{U_r^2 + U_s^2 + 2U_r U_s \sin \varphi_s(t)}$$

$$|u_{D2}| = \sqrt{U_r^2 + U_s^2 - 2U_r U_s \sin \varphi_s(t)}$$

设包络检波器的传输系数 $k_{d1} = k_{d2} = k_d$

$$\text{则 } u_o = u_{o1} - u_{o2} = k_d (|u_{D1}| - |u_{D2}|)$$

$$\left. \begin{aligned} |u_{D1}| &= U_r \left(1 + \frac{U_s}{U_r} \sin \varphi_s(t) \right) \\ |u_{D2}| &= U_r \left(1 - \frac{U_s}{U_r} \sin \varphi_s(t) \right) \end{aligned} \right\} u_o = 2k_d U_s \sin(\varphi_s(t))$$

$$\text{② 当 } u_r \ll u_s \text{ 时 } u_o = 2k_d U_r \sin(\varphi_s(t))$$



7.4 检频器与检频方法

二、检频方法

2. 相位鉴频法

② 叠加型相位鉴频法——改进

$$|u_{D1}| = \sqrt{U_r^2 + U_s^2 + 2U_r U_s \sin \varphi_s(t)}$$

$$|u_{D2}| = \sqrt{U_r^2 + U_s^2 - 2U_r U_s \sin \varphi_s(t)}$$

$$|u_{D1}| = \sqrt{2}U_s \sqrt{1 + \sin \varphi_s(t)}$$

③ 当 $u_r = u_s$ 时

$$|u_{D2}| = \sqrt{2}U_s \sqrt{1 - \sin \varphi_s(t)}$$

$$u_o = \sqrt{2}k_d U_s [\sqrt{1 + \sin \varphi_s(t)} - \sqrt{1 - \sin \varphi_s(t)}] \left\{ \begin{array}{l} \because \sqrt{1 + \sin x} = \cos(x/2) + \sin(x/2) \\ \sqrt{1 - \sin x} = \cos(x/2) - \sin(x/2) \end{array} \right. \quad \square \quad u_o = 2\sqrt{2}k_d U_s \sin \frac{\varphi_s(t)}{2}$$

所以当 $|\frac{\varphi_s(t)}{2}| \leq \frac{\pi}{12}$

时，即 $|\varphi_s(t)| \leq \frac{\pi}{6}$

时，可获得线性的鉴相输出



7.4 检频器与检频方法

二、检频方法

2. 相位鉴频法

② 叠加型相位鉴频法——改进

$$u_o = 2\sqrt{2}k_d U_s \sin \frac{\varphi_s(t)}{2}$$

$$u_o = 2k_d U_r \sin(\varphi_s(t))$$

结论：

(1) 平衡式叠加型鉴相器的工作过程可以看作是由两个过程组成，第一步是通过调相电压与参考电压（ 90° 相移）叠加为 FM-PM-AM 信号，第二步由包络检波器把合成信号的包络取出来。

(2) 当 U_s 与 U_r 的振幅相差很大 $U_s \ll U_r$ ，或 $U_s \gg U_r$ 时，鉴相器输出取决于振幅小的那个输入电压，几乎与振幅大的那个输入电压无关，正弦型鉴相特性线性范围

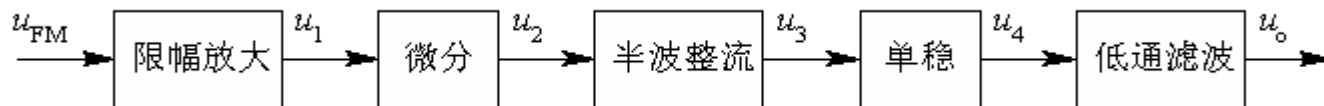
(3) 当 $U_s = U_r$ 时，鉴相器输出电压为 U_r 相差很大的时的 5 倍，而线性范围扩展为二者振幅相差很大时的 2 倍。



7.4 鉴频器与鉴频方法

二、检频方法

3. 直接脉冲计数式鉴频法



•从某种意义上讲，信号频率就是信号电压或电流波形单位时间内过零点（或零交点）的次数。

•对于脉冲或数字信号，信号频率就是信号脉冲的个数。基于这种原理的鉴频器称为零交点鉴频器或脉冲计数式鉴频器。

