第六章 调幅与检波

6.1 调幅原理

6.2 调幅电路

6.3 调幅波的解调–检波

6.3 调幅波的解调–检波

调幅的逆过程。从频谱变换的角度，检波过程就是把已调波的频谱从高频区平行搬到低频区区域的过程，必须借助非线性电路才能实现。

1、包络检波：　均值包络检波、峰值包络检波

适用对象：普通调幅波

特点：电路简单，成本低，广泛用于民用调幅接收机

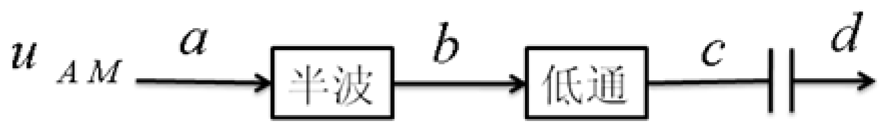
2、同步检波　适用对象：普通调幅，DSB, SSB

特点：电路复杂，需要载波恢复电路

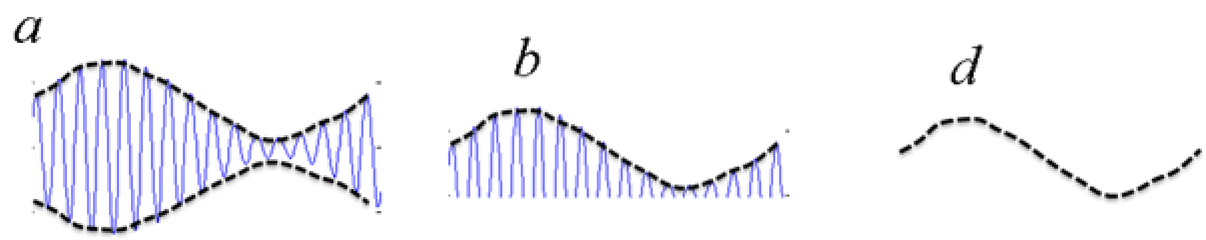
6.3 调幅波的解调-检波

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

6.3.1 均值包络检波



1. 工作原理



$$u_{AM} = U_c[1+ms(t)]\cos\omega_c t = b(t)\cos\omega_c t$$

$$u_b = U_a K^+(\omega_c t) = b(t)\cos\omega_c t[\frac{1}{2}+\frac{2}{\pi}\cos\omega_c t-\frac{2}{3\pi}\cos 3\omega_c t+...]$$

低频部分由$b(t)\cos\omega_c t\cdot\frac{2}{\pi}\cos\omega_c t$产生

$b(t)\cos\omega_c t\cdot\frac{2}{\pi}\cos\omega_c t=\frac{b(t)}{\pi}(1+\cos 2\omega_c t)$中的$\frac{b(t)}{\pi}$部分。

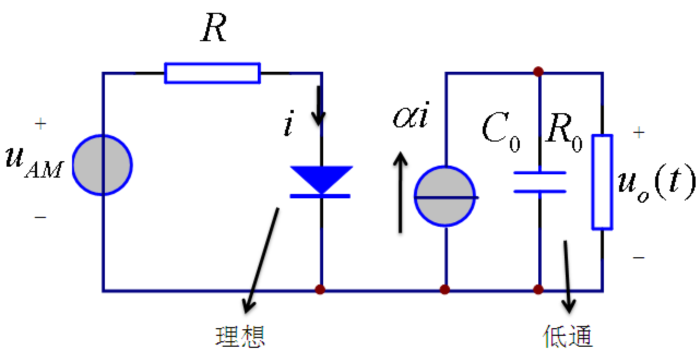
$$\therefore u_c = \frac{b(t)}{\pi} = \frac{U_c[1+ms(t)]}{\pi} \qquad u_d = \frac{U_c ms(t)}{\pi}$$

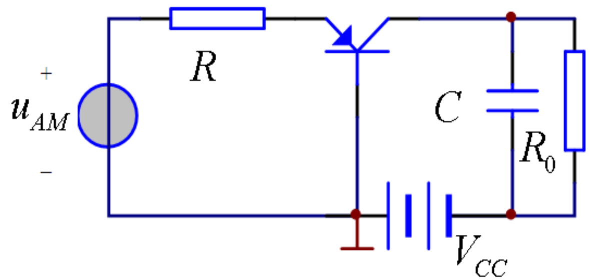
6. 3 调幅波的解调–检波

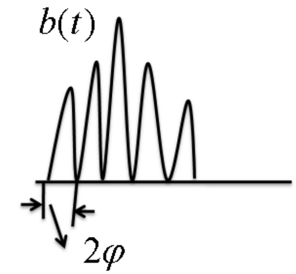
2. 具体电路

检波二极管都用锗管近似理想特性。

$$\alpha_0(\varphi)=\frac{\sin\varphi-\varphi\cos\varphi}{\pi(1-\cos\varphi)}$$







U_T=0.15 ~ 0.22V　　$\varphi<90^o$

$$\begin{cases} U_T=0 \\ \varphi=90^o \\ i=\dfrac{b(t)\cos\omega_c t}{R}K^+(\omega_c t) \\ u_o=\dfrac{\alpha G R_0}{\pi}b(t) \end{cases}$$

低频部分：$\dfrac{Gb(t)}{\pi}$

$$\varphi=\cos^{-1}\frac{U_T-0}{b(t)}\qquad I_{EP}=Gb(t)(1-\cos\varphi)$$

$$I_{C0}=\alpha I_{E0}=I_{CP}\alpha_0(\varphi)=\frac{\alpha Gb(t)}{\pi}(\sin\varphi-\varphi\cos\varphi)$$

$x=\dfrac{U_T}{b(t)}<1$, 在一定条件下，x很小时：$x\le\sqrt{0.02}=0.14$或$b(t)_{\min}\ge 7U_T$

$$\sin\varphi-\varphi\cos\varphi=(1-\frac{\pi}{2}x+\frac{x^2}{2}+\ldots)\approx 1-\frac{\pi}{2}x$$

$$u_{AM}=b(t)\cos\omega_c t$$

$$I_{C0}=\frac{\alpha Gb(t)}{\pi}\left[1-\frac{\pi}{2}\frac{U_T}{b(t)}\right]=\frac{\alpha Gb(t)}{\pi}-\frac{\alpha GU_T}{2}$$

线性检波

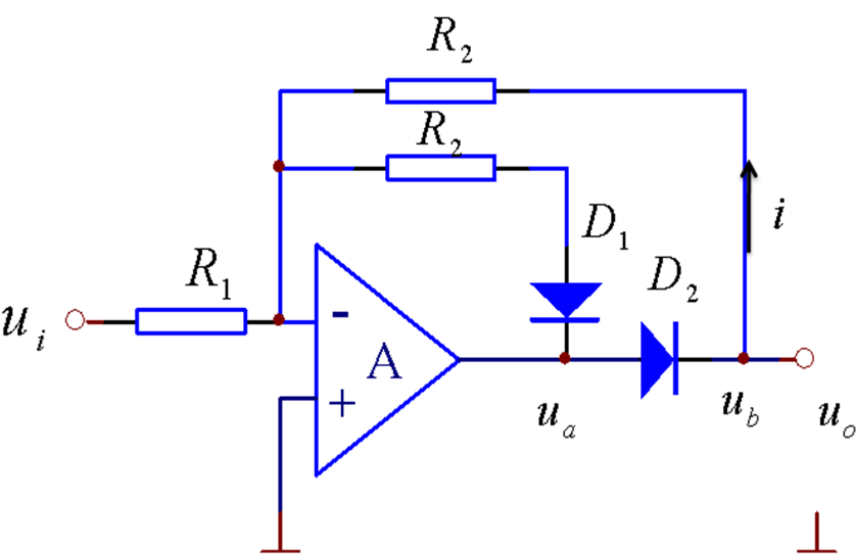
6. 3. 2 理想二极管电路

发射结导通电压的存在将会引起包络检波的非线性失真，若通过加大输入已调电压的幅度来减小非线性失真的程度，将会引起发射结反偏电压过高，容易击穿（发射结反偏电压一般不应超过5V，否则容易击穿）。

例：设 $U_T=0.2V$，调幅指数 $m=0.8$，若$b(t)_{\min}=U_C(1-0.8)=7U_T=1.4V\Rightarrow U_C=7V$

$$\therefore b(t)_{\max}=U_C(1+m)=7(1+0.8)=12.6V$$

有可能击穿发射结



通过非线性反馈，实现近乎理想的二极管

A：高增益运算放大器

R_2、D_1支路：防止A在 u_i 正半周出现开环状态。

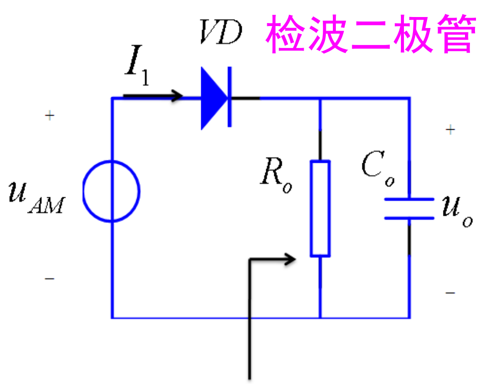
① u_i 正半周，$D_1^+, D_2^-, u_o=0$；

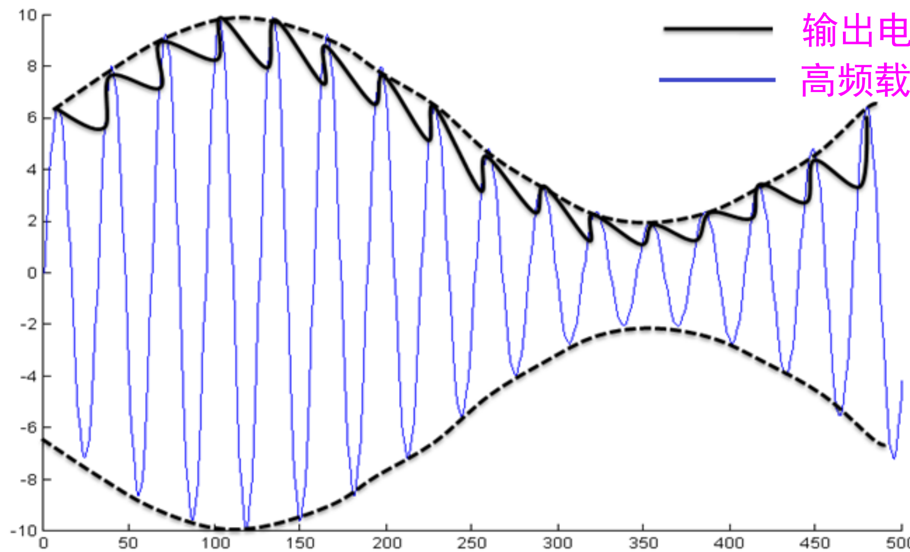
② u_i 负半周，D_2^+, D_1^-，$u_o=-\dfrac{R_2}{R_1}u_i$ 。

$$\therefore u_o=-\frac{R_2}{R_1}u_iK^-(\omega_c t)$$

利用集成电路技术制成，做在接收机芯片里

6. 3. 3 峰值包络检波





R_oC_o 组成低通滤波器 $\tau_{充}=C_o(R_d//R_o)\approx 0$

1. 工作原理

$\tau_{放}=R_oC_o$很大　　$\tau_{放}\approx(10^3\sim10^4)\ \tau_{充}$

① u_{AM} 正半周:VD导通，u_{AM} 经很小的导通电阻给 C_o 充电，使其上电压很快达到u_{AM} 的峰值;

②峰值过后，VD因反偏而截止，C_o 上电压经 R_o 放电，u_o按指数规律缓慢下降；直到下一个正峰值到来时，VD才又导通。

输出电压为 u_o 有毛刺的音频信号，带有锯齿状纹波，既是输出电压，又是二极管的反偏电压。

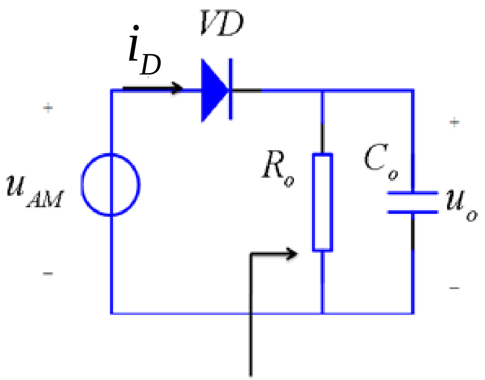
2. 性能分析

$$u_{AM} = U_C[1+ms(t)]\cos\omega_c t = b(t)\cos\omega_c t$$

$$b(t) = U_C[1+ms(t)] = U_C[1+m\cos\Omega_m t]$$

$$u_o(t) = b(t)$$

①假定二极管是理想的



i_D为窄脉冲（通角很小）

$$i_D = I_{D0} + I_{D1}\cos\omega_c t + I_{D2}\cos 2\omega_c t + \ldots\ldots$$

$$I_{Dn} = 2I_{D0}(n=1,2,\ldots\ldots)$$

低通滤波：$U_o = I_{D0}R_o \Rightarrow I_{D0} = \dfrac{U_o}{R_o} = \dfrac{b(t)}{R_o}$

定义参数

$$R_i = \frac{U_o}{I_1} \text{—基波阻抗}$$

$$k = \frac{U_o}{b(t)} \text{—检波增益}$$

$$\gamma = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty}\frac{U_n^2}{U_o^2}} \approx \frac{U_1}{U_o} \text{—纹波系数} = \frac{\text{纹波电压}}{\text{输出电压}}$$

$$R_i = \frac{b(t)}{2I_{D0}} = \frac{1}{2}R_o$$

U_o变化紧跟$b(t)$变化

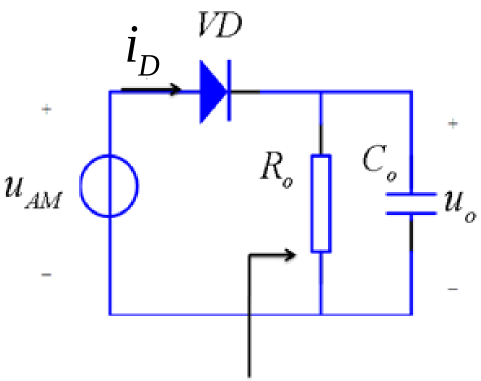
$$k = 1$$

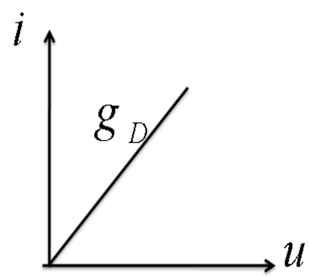
$$Z(\omega_c) = \frac{R_o}{1+j\omega_c R_o C_o} \Rightarrow |Z(\omega_c)| = \frac{R_o}{\sqrt{1+\omega_c^2 R_o^2 C_o^2}} \approx \frac{1}{\omega_c C_o}$$

$$\therefore \gamma = \frac{2I_{D0}\dfrac{1}{\omega_c C_o}}{I_{D0}R_o} = \frac{2}{\omega_c R_o C_o}$$

$\tau = R_o C_o$越大，纹波越小，锯齿状少。

②二极管为折线化模型：$U_T=0$，导通电导为g_D





$$u_{AM}=u_o+u_D \qquad k<1$$

$$u_D=b(t)\cos\omega_c t-u_o$$

$$\begin{cases} I_{OP}=g_D b(t)(1-\cos\varphi) \\ \cos\varphi=\dfrac{0-(-u_o)}{b(t)}=\dfrac{u_o}{b(t)}\Rightarrow\varphi=\cos^{-1}\dfrac{u_o}{b(t)} \end{cases}$$

$$\therefore u_o=I_{D0}R_0=R_0 g_D b(t)(1-\cos\varphi)\alpha_0(\varphi)-\text{低通滤波}$$

$$=R_0 g_D b(t)(1-\cos\varphi)\frac{1}{\pi}\frac{\sin\varphi-\varphi\cos\varphi}{1-\cos\varphi}=R_0 g_D b(t)\frac{\sin\varphi-\varphi\cos\varphi}{\pi}$$

$$\therefore \cos\varphi=\frac{u_o}{b(t)}=k=R_0 g_D\frac{\sin\varphi-\varphi\cos\varphi}{\pi}\Rightarrow tg\varphi-\varphi=\frac{\pi}{R_0 g_D}$$

$$\because tg\varphi=\varphi+\frac{1}{3}\varphi^3+\frac{1}{5}\varphi^5+\ldots$$

$$\therefore \frac{1}{3}\varphi^3=\frac{\pi}{R_0 g_D}\Rightarrow\varphi=\sqrt[3]{\frac{3\pi}{R_0 g_D}}\;\overset{\substack{\text{若}R_0=10K\\ \frac{1}{g_D}=20}}{=}\;13^0$$

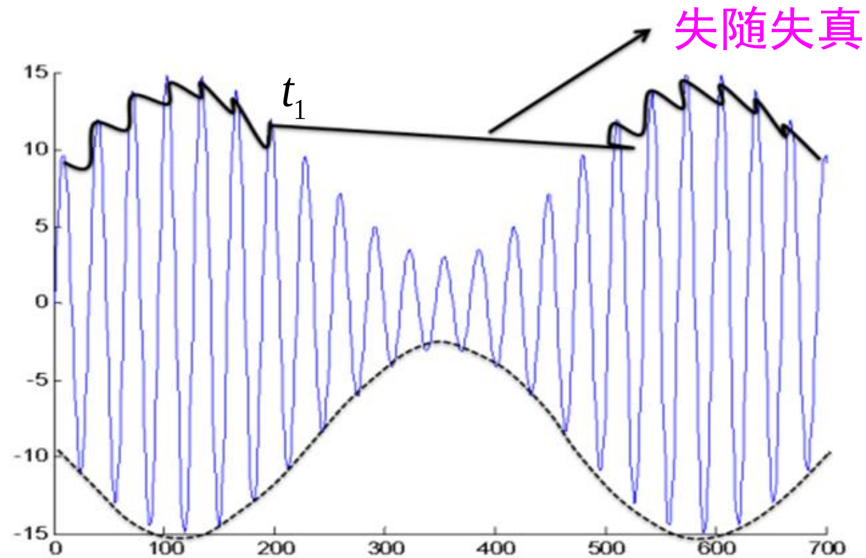
导通角越小，检波增益越高

6.3 调幅波的解调-检波

③检波失真-失随失真

$$\gamma = \frac{2I_{D0}\dfrac{1}{\omega_c C_o}}{I_{D0}R_o} = \frac{2}{\omega_c R_o C_o}$$

若为了减小纹波而选用太大 R_o、C_o，或检波器负载电阻太小，会导致输出电压不能完全跟随输入电压的包络变化。



产生原因：

在 $b(t)$ 负斜率处，若在某个高频正峰值过后（t_1），若包络的下降速率大于输出电压的下降速率，使得在 t_1 后的若干个周期内，检波二极管处于反偏而截止，输出电压就与输入信号的包络无关而按指数下降。

$$\left|\frac{db(t)}{dt}\right| \text{越大，失真越严重}$$

$$b(t) = U_C[1+ms(t)] = U_C[1+m\cos\Omega_m t]$$

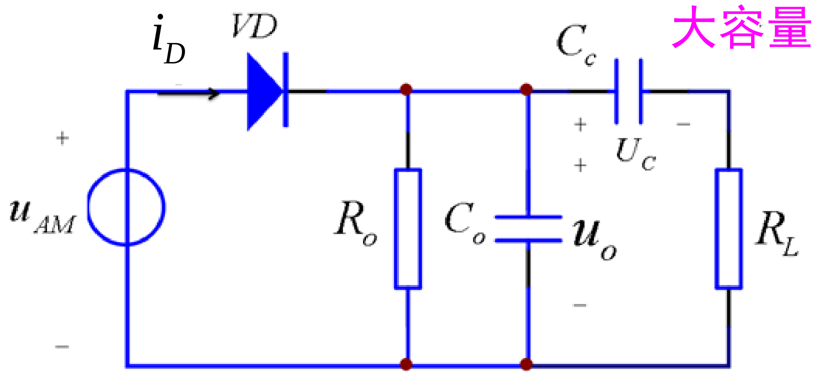
$$\Rightarrow \left|\frac{db(t)}{dt}\right| = mU_C\Omega_m \sin\Omega_m t$$

$$\therefore m\text{越大，}\Omega_m\text{越高，}\left|\frac{db(t)}{dt}\right|\text{越大，越容易失真}$$

6.3 调幅波的解调–检波

克服失随失真的条件（考察图示实际带负载检波电路）

$$b(t)=U_C(1+m\cos\Omega_m t)$$



大容量电容

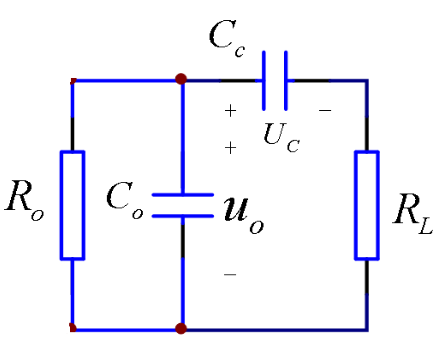
在任何时候都必须保证 $\left|\dfrac{du_o}{dt}\right|>\left|\dfrac{db(t)}{dt}\right|$

$$\left|\frac{db(t)}{dt}\right|=mU_C\Omega_m\sin\Omega_m t$$

考虑频率最大的情况

$$\left|\frac{db(t)}{dt}\right|_{t=t_1}=U_C m\Omega_{\max}\sin\Omega_{\max}t_1$$

t_1以后的等效电路 $\quad U_o=U_C(1+m\cos\Omega_{\max}t_1)$



① C_o放电引起U_O变化

$$U_{o1}=U_C(1+m\cos\Omega_{\max}t_1)e^{-\frac{t-t_1}{\tau}}\qquad \tau=(R_o//R_L)C_o$$

② C_C放电给C_o反向充电引起U_O变化

$$U_{o2}=U_C\frac{R_o}{R_o+R_L}(1-e^{-\frac{t-t_1}{\tau}})$$

6.3 调幅波的解调–检波

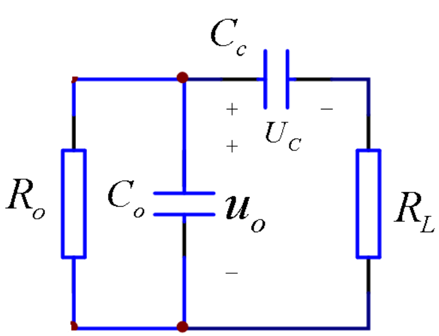
$$\therefore U_o = U_{o1} + U_{o2} = U_C(1+m\cos\Omega_{\max}t_1)e^{-\frac{t-t_1}{\tau}} + U_C\frac{R_o}{R_o+R_L}(1-e^{-\frac{t-t_1}{\tau}})$$

$$\left.\frac{dU_o}{dt}\right|_{t=t1} = -\frac{U_C(1+m\cos\Omega_{\max}t_1)}{\tau} + U_C\frac{R_o}{R_o+R_L}\frac{1}{\tau}$$

$$= -U_C(1+m\cos\Omega_{\max}t_1 - \frac{R_o}{R_o+R_L})\frac{1}{\tau}$$

$$= -U_C(\frac{R_L}{R_o+R_L} + m\cos\Omega_{\max}t_1)/\tau$$

$$= -U_C(k+m\cos\Omega_{\max}t_1)/\tau$$

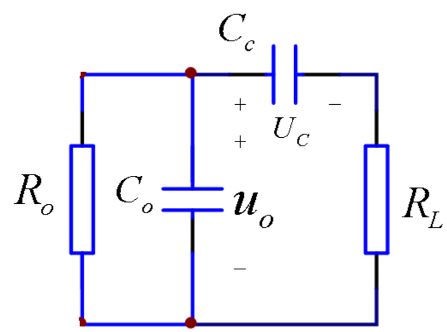


$$k = \frac{R_o//R_L}{R_o} = \frac{R_L}{R_o+R_L}$$ –交流负载与直流负载之比

6.3 调幅波的解调–检波

为保证不出现失随失真，需满足：

$$\left|\frac{du_o}{dt}\right| > \left|\frac{db(t)}{dt}\right|$$



$$U_C(k+m\cos\Omega_{\max}t_1)/\tau \geq U_C m\Omega_{\max}\sin\Omega_{\max}t_1$$

$$\Rightarrow (k+m\cos\Omega_{\max}t_1)/\tau \geq m\Omega_{\max}\sin\Omega_{\max}t_1$$

$$\Rightarrow \frac{k}{\tau}+\frac{m}{\tau}\cos\theta \geq m\Omega_{\max}\sin\theta \qquad \theta=\Omega_{\max}t_1$$

$$\Rightarrow k+m\cos\theta-m\tau\Omega_{\max}\sin\theta \geq 0$$

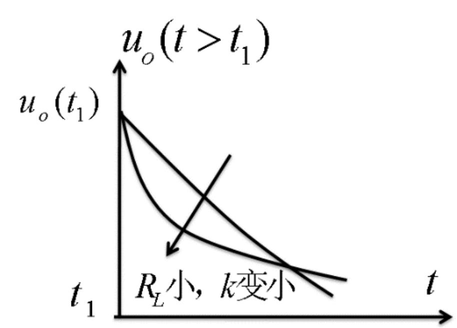
$$\Rightarrow k+m\sqrt{1+(\Omega_{\max}\tau)^2}\cos(\theta+\varphi)>0$$

$$\varphi = arctg\,\Omega_{\max}\tau$$

克服失随失真的条件

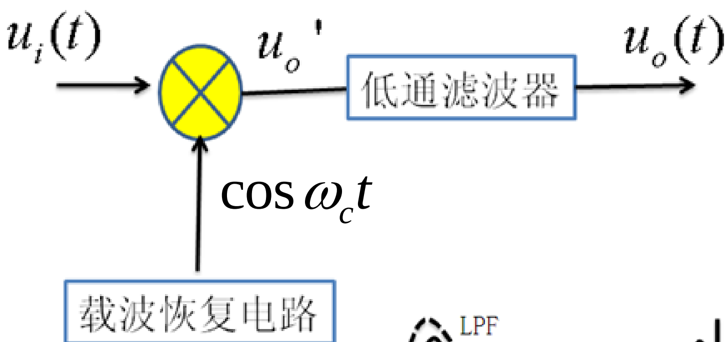
当$k-m\sqrt{1+(\Omega_{\max}\tau)^2}>0$时对所有都成立

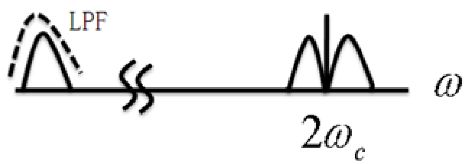
此时有：$m \leq \dfrac{k}{\sqrt{1+[\Omega_{\max}(R_o//R_L)C_0]^2}}$



6.3.4 同步检波

同步检波的前提是接收机中本地载波恢复电路恢复出与发射端同频、同相的载波，有叠加型和乘积型（采用较多）两种。





①一般AM

$$u_o' = U_o[1+ms(t)]\cos\omega_c t\cos\omega_c t$$

$$= b(t)\frac{1+\cos 2\omega_c t}{2} = \frac{1}{2}b(t) + \frac{1}{2}b(t)\cos 2\omega_c t$$

$$\therefore u_o(t) = \frac{1}{2}b(t)$$

②SSB

$$u_o' = [s(t)\cos\theta - x(t)\sin\theta]\cos\theta \qquad \theta = \omega_c t$$

$$= \frac{s(t)+s(t)\cos 2\theta}{2} - \frac{x(t)}{2}\sin 2\theta$$

$$\therefore u_o = \frac{1}{2}s(t)$$

③DSB

$$u_o' = s(t)\cos\theta\cos\theta = \frac{1}{2}s(t) + \frac{1}{2}s(t)\cos 2\theta$$

$$\therefore u_o = \frac{1}{2}s(t)$$

6.3 调幅波的解调–检波

同步检波的先决条件：本地载波同频、同相恢复。

1. 同相必要性

$$s(t)\cos\omega_c t \xrightarrow{\text{恢复}} \cos(\omega_c t+\varphi)$$

$$u_o' = s(t)\cos\omega_c t\cos(\omega_c t+\varphi) = \frac{1}{2}s(t)\cos\varphi + \frac{1}{2}s(t)\cos(2\omega_c t+\varphi)$$

$$\Rightarrow u_o = \frac{1}{2}s(t)\cos\varphi$$

不同相会引起检波增益下降，当 $\varphi = 90^o$时，$u_o = 0$，检波失败。

2. 同频必要性

$$s(t)\cos\omega_c t \xrightarrow{\text{恢复}} \cos(\omega_c+\Delta)t$$

$$u_o' = s(t)\cos\omega_c t\cos(\omega_c+\Delta)t = \frac{1}{2}s(t)\cos\Delta t + \frac{1}{2}s(t)\cos(2\omega_c+\Delta)t$$

$$\Rightarrow u_o = \frac{1}{2}s(t)\cos\Delta t$$

不同频时，输出出现差拍，即听到声音的强弱是周期性变化的，严重影响信息的可懂度。

对声音信号而言，可允许不同相，但不允许不同频，对其它一些场合，则都不允许，例如电视图像接收恢复。

6.3 调幅波的解调–检波

- 作业：**6.14(1)，6.16**