

## 第三次习题课

第7章：角度调制与解调电路

第8章：反馈控制电路

第9章：频率合成技术

## P281, 第7.7题

有一已调波电压  $v(t) = V_m \cos(\omega_c + A\omega_1 t)t$ ，试求它的  $\Delta\varphi(t)$ 、 $\Delta\omega(t)$  的表达式。如果它是调频波或调相波，它们相应的调制电压各为什么？

$$\text{解: } \Delta\varphi(t) = A\omega_1 t^2, \quad \Delta\omega(t) = \frac{d\Delta\varphi(t)}{dt} = 2A\omega_1 t$$

若为调频波，则由于瞬时频率  $\Delta\omega(t)$  变化与调制信号成正比，即

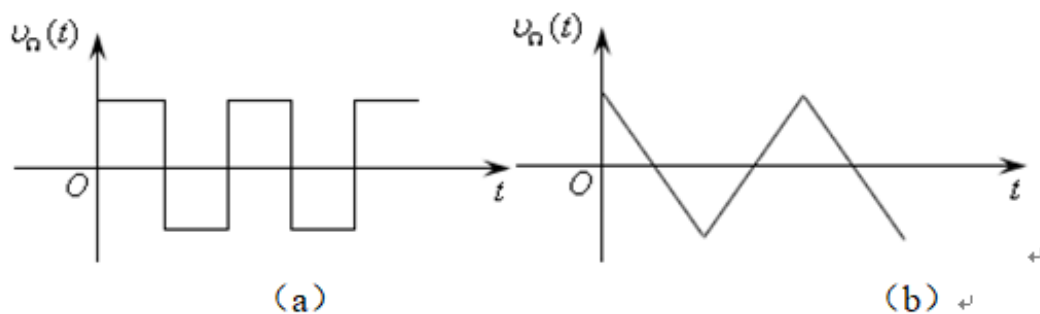
$$\Delta\omega(t) = k_f u_\Omega(t) = 2A\omega_1 t, \quad \text{所以调制电压 } u_\Omega(t) = \frac{1}{k_f} 2A\omega_1 t$$

若为调相波，则由于瞬时相位变化  $\Delta\varphi(t)$  与调制信号成正比，即

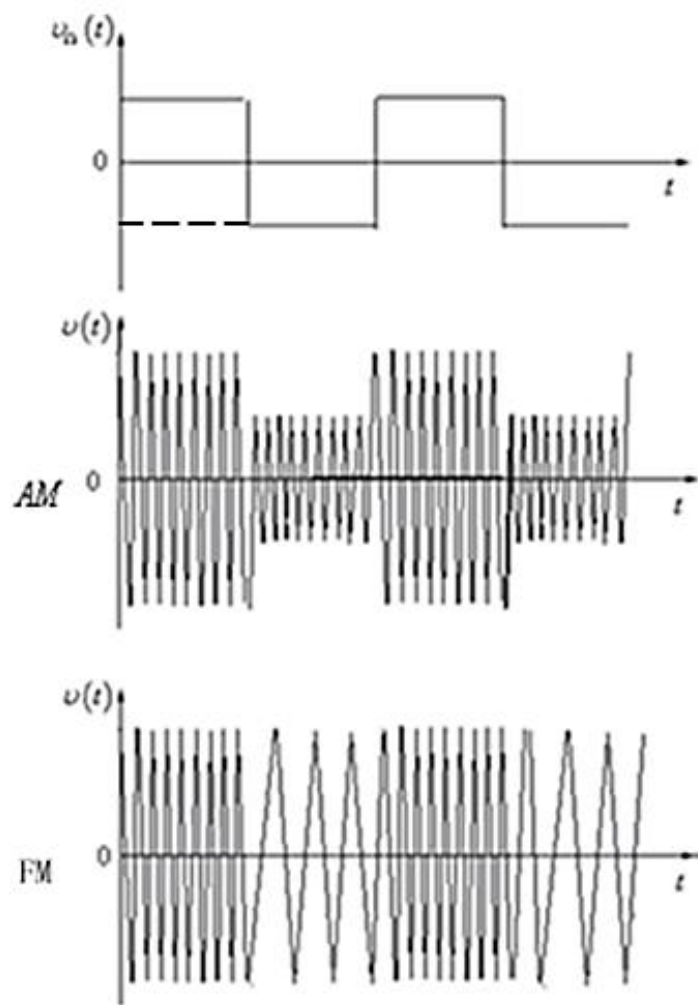
$$\Delta\varphi(t) = k_p u_\Omega(t) \quad \text{所以调制电压 } u_\Omega(t) = \frac{1}{k_p} A\omega_1 t^2$$

## P281, 第7.8题

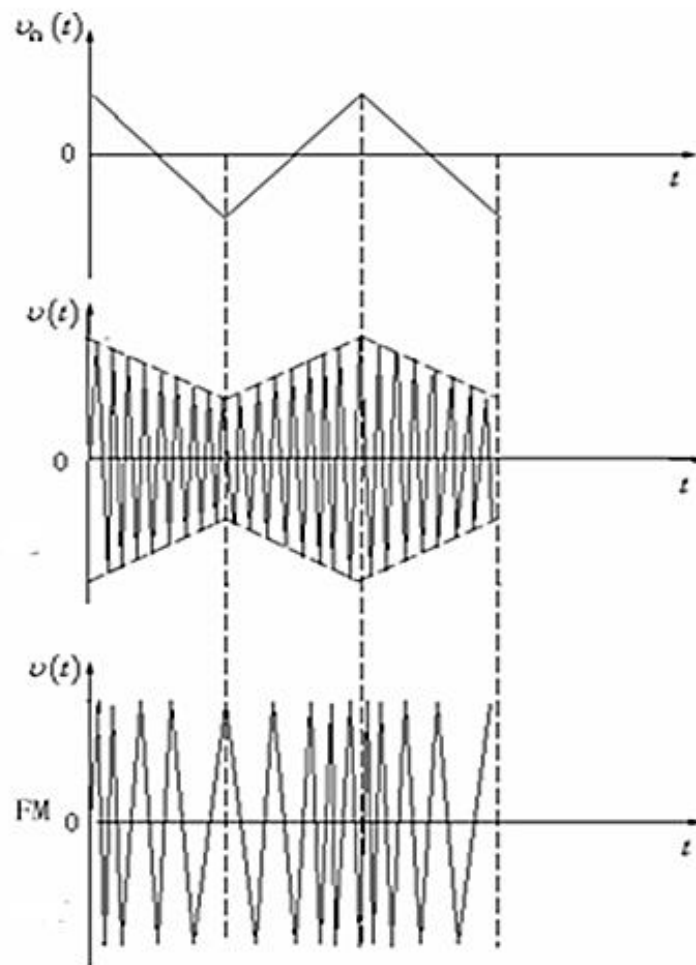
7.8 已知载波信号  $v_c(t) = V_{cm} \cos \omega_c t$ ，调制信号为周期性方波和三角波，分别如题 7.8 图(a) 和 (b) 所示。试画出下列波形：(1) 调幅波，调频波；(2) 调频波和调相波的瞬时角频率偏移  $\Delta\omega(t)$ 。瞬时相位偏移  $\Delta\phi(t)$  (坐标对齐)。



题7.8图

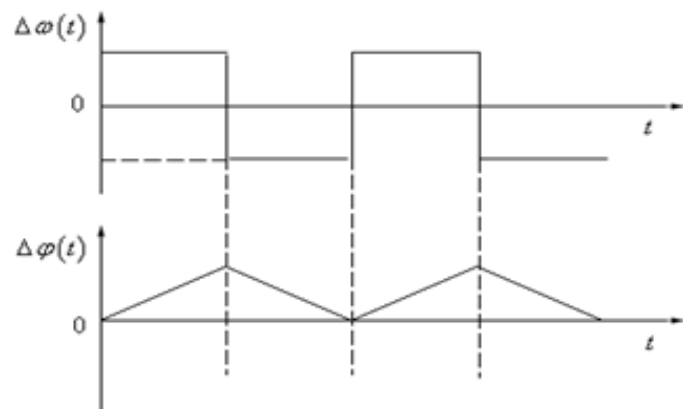


(a)

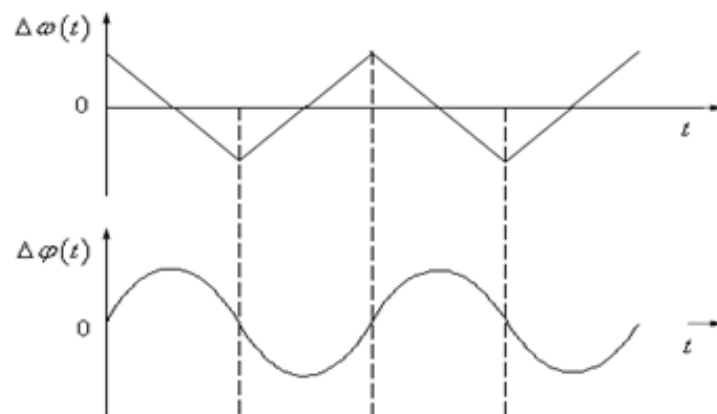


(b)

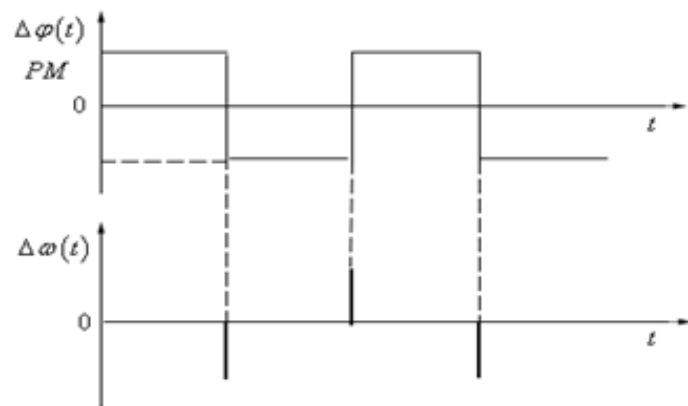
FM



FM

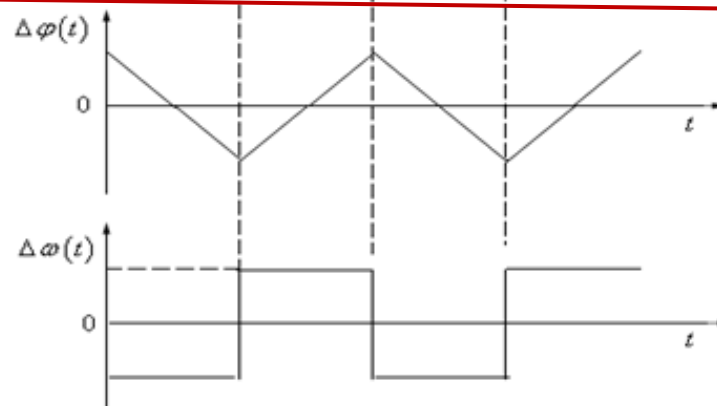


PM



(a)

PM



(b)

## P281, 第7.9题

有一个 AM 波和 FM 波，载频均为 1MHz，调制信号均为  $v_{\Omega}(t) = 0.1\sin(2\pi \times 10^3 t)\text{V}$ 。

频率调制的调频灵敏度  $k_f = 1\text{kHz/V}$ ，动态范围大于 20V。

- (1) 求 AM 波和 FM 波的信号带宽；
- (2) 若  $v_{\Omega}(t) = 20\sin(2\pi \times 10^3 t)\text{V}$ ，重新计算 AM 波和 FM 波的带宽；
- (3) 由以上两项计算结果可得出什么结论？

解：(1) AM 波的信号带宽：  $BW = 2F = 2 \times 10^3 = 2\text{kHz}$  ↵

$$\text{FM 波的信号带宽： } M_f = \frac{k_f V_{\Omega m}}{\Omega} = 2\pi \times 1 \times \frac{0.1}{2\pi \times 1} = 0.1 \text{ ↵}$$

**卡森带宽**  $BW = 2(M_f + 1)F = 2(0.1 + 1) \times 1 \approx 2 \times 10^3 = 2\text{kHz}$  ↵

(2) 若  $v_{\Omega}(t) = 20 \sin(2\pi \times 10^3 t) \text{V}$  ↵

AM 波的信号带宽：  $BW = 2F = 2 \times 10^3 = 2\text{kHz}$  ↵

$$\text{FM 波的信号带宽： } M_f = \frac{k_f V_{\Omega m}}{\Omega} = 2\pi \times 1 \times \frac{20}{2\pi \times 1} = 20 \text{ ↵}$$

$$BW = 2(M_f + 1)F = 2(20 + 1) \times 1 \approx 40 \times 10^3 = 40\text{kHz} \text{ ↵}$$

窄带调频时，其带宽等于AM信号的带宽；

宽带调频时，带宽近似等于最大频偏的两倍。

## P281, 第7.10题

已知载波频率 $f_c=1400\text{ MHz}$ ,载波振幅 $V_{cm}=5\text{ V}$ ,

调制信号

$$v_{\Omega}(t) = \cos(2\pi \times 10^3 t) V + 2 \cos(2\pi \times 1500 t) V$$

设最大频偏  $\Delta f_m = 20\text{ KHz}$

试写出调频波的表达式



首先寻找 $v_{\Omega}(t)$ 的最大值是多少？

当 $t=0$ 时可以得到  $V_{\Omega m} = 3 \text{ V}$

最大频偏:  $\Delta f_m = k_f V_{\Omega m} = 20 \text{ kHz}$

调制灵敏度  $k_f = \frac{20}{3} \times 10^3 \text{ Hz/V}$

对调制信号积分可得相位

$$\Delta\phi(t) = \int_0^t k_f v_{\Omega}(t) = \frac{k_f}{2\pi \times 10^3} \sin(2\pi \times 10^3 t) + \frac{2k_f}{2\pi \times 1500} \sin(2\pi \times 1500 t)$$

把相位信息带入载波信号即可得到FM信号

## P282, 第7.11题

已知  $v(t) = 500 \cos(2\pi \times 10^8 t + 20 \sin 2\pi \times 10^3 t) \text{ mV}$  , ↵

- (1) 若为调频波, 试求载波频率  $f_c$ 、调制频率  $F$ 、调频指数  $M_f$ 、最大频偏  $\Delta f_m$ 、有效频谱宽度  $BW_{CR}$  和平均功率  $P_{av}$  (设负载电阻  $R_L = 50\Omega$ )。↵
- (2) 若为调相波, 试求调相指数  $M_p$ , 调制信号  $v_\Omega(t)$  (设调相灵敏度  $k_p = 5 \text{ rad/V}$ , 最大频偏  $\Delta f_m$ )。↵

解：根据  $v(t)$  表达式， $\omega_c = 2\pi \times 10^8 \text{ rad/s}$ ， $\Delta\varphi(t) = 20 \sin(2\pi \times 10^3 t) \text{ rad}$ ，求得

$$(1) \text{ FM 波: } f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{2\pi \times 10^8}{2\pi} = 100 \text{ MHz}, \quad F = \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{2\pi \times 10^3}{2\pi} \text{ Hz} = 1 \text{ kHz},$$

$$M_f = 20 \text{ rad}, \quad \Delta f_m = M_f F = 20 \text{ kHz},$$

$$\text{所以} \quad BW_{CR} = 2(M_f + 1)F = 42 \text{ kHz}, \quad P_{av} = \frac{1}{2} \frac{V_m^2}{R_L} = 2.5 \text{ mW},$$

$$(2) \text{ PM 波: } M_p = 20 \text{ rad},$$

$$\text{因为} \quad k_p v_\Omega(t) = 20 \sin(2\pi \times 10^3 t),$$

$$\text{所以} \quad v_\Omega(t) = \frac{20}{5} \sin(2\pi \times 10^3 t) = 4 \sin(2\pi \times 10^3 t) \text{ (V)},$$

$$\Delta f_m = M_p F = 20 \text{ kHz}$$

## P282, 第7.14题

调频振荡回路由电感  $L$  和变容二极管组成,  $L = 2\mu\text{H}$ , 变容二极管的参数为:

$C_j(0) = 225\text{pF}$ ,  $n = \frac{1}{2}$ ,  $V_B = 0.6\text{V}$ ,  $V_Q = -6\text{V}$ , 调制信号  $v_\Omega(t) = 3\sin 10^4 t$ 。求输出 FM 波时:

(1) 载波  $f_c$ ; (2) 由调制信号引起的载频偏移  $\Delta f_c$ ; (3) 最大频率偏移  $\Delta f_m$ ;

(4) 调频灵敏度  $k_f$ ; (5) 二阶失真系数  $k_{f2}$ 。

解：（1）载波 $\omega$

$$C_{jQ} = \frac{C_j(0)}{(1 + \frac{V_Q}{V_B})^{\frac{1}{2}}} = \frac{225}{(1 + \frac{6}{0.6})^{\frac{1}{2}}} = \frac{225}{3.32} = 67.8(pF) \omega$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{jQ}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2 \times 10^{-6} \times 67.8 \times 10^{-12}}} = \frac{10^9}{2\pi\sqrt{2 \times 67.8}} = 13.7(MHz)$$

（2）由调制信号引起的载频偏移  $\Delta f_o$   $\omega$

$$m = \frac{V_{\Omega m}}{V_B + V_Q} = \frac{3}{6 + 0.6} \approx 0.455 \omega$$

$$\Delta f_c = \frac{n}{8} (\frac{n}{2} - 1) m^2 f_c = \frac{1}{16} (\frac{1}{4} - 1) \times 0.455^2 \times 13.7 = 0.133(MHz) \omega$$

(3) 最大频率偏移  $\Delta f_m$

$$\Delta f_m = \frac{1}{2} n m f_c = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times 0.455 \times 13.7 = 1.56(\text{MHz})$$

(4) 调频灵敏度  $k_f$

$$k_f = \frac{\Delta f_m}{V_{\Omega m}} = \frac{1.56}{3} = 0.52(\text{MHz/V})$$

(5) 二阶失真系数  $k_2$

$$k_{f2} = \left| \frac{m}{4} \left( \frac{n}{2} - 1 \right) \right| = 0.09$$

## P282, 第7.15题

画出图7.3.7所示调频电路的高频通路、变容管的直流通路和音频控制电路。

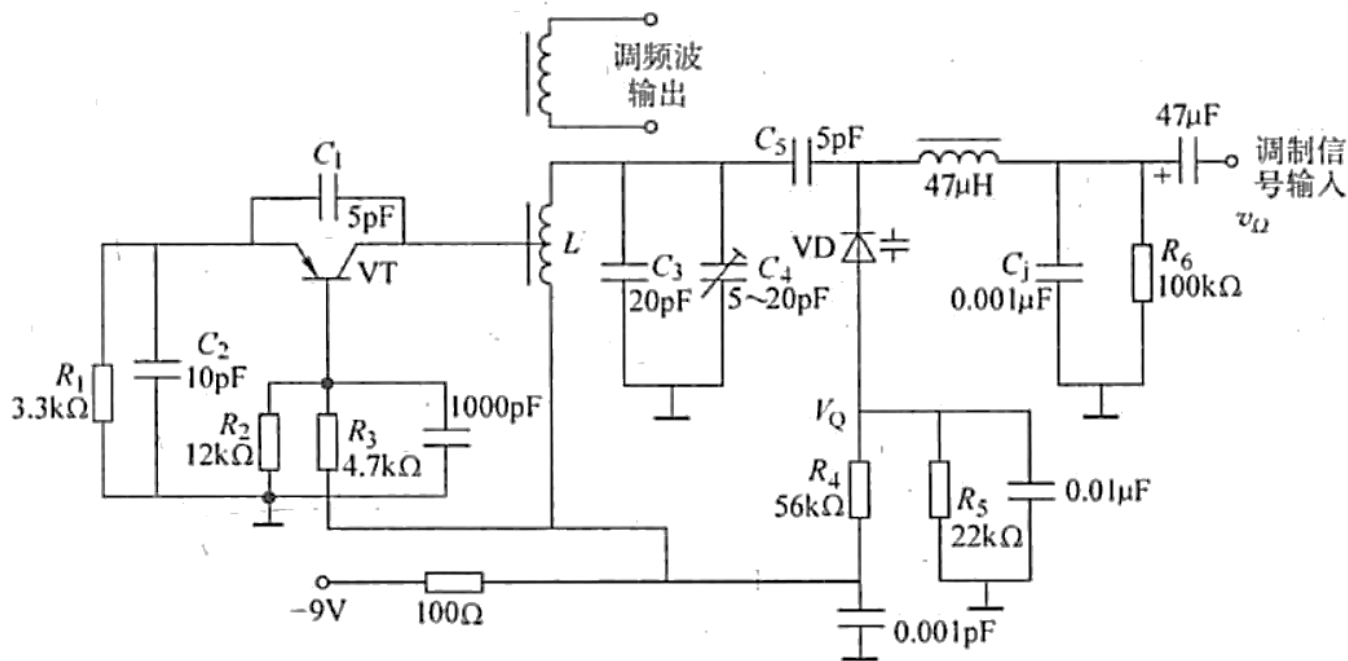
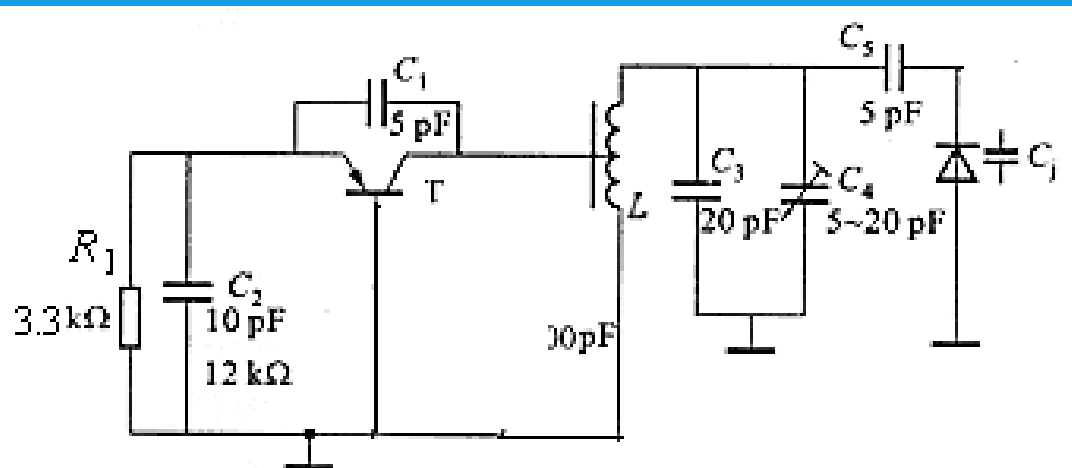
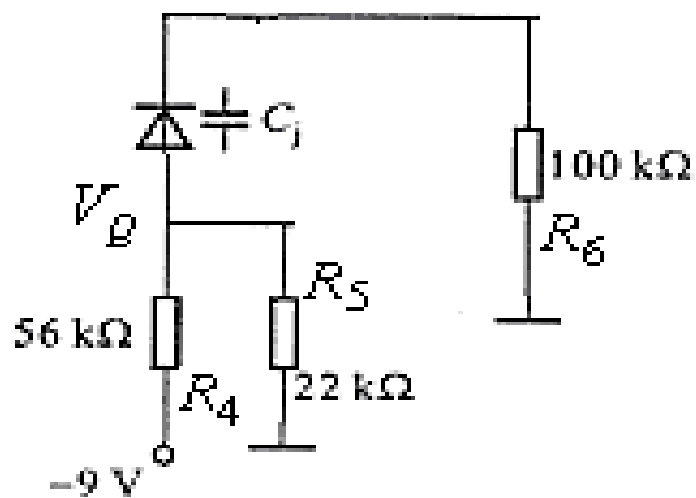


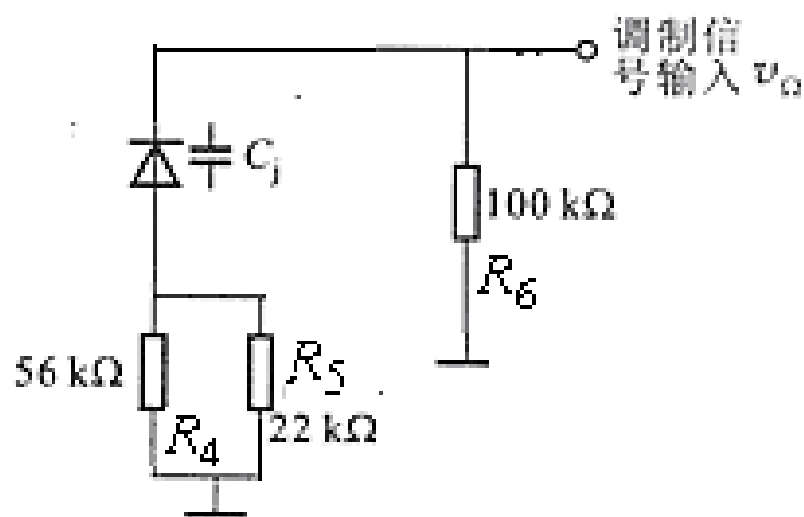
图 7.3.7 90 MHz 的变容二极管作回路部分电容的直接调频电路



高频通路



直流通路



音频控制电路



## P282, 第7.16题

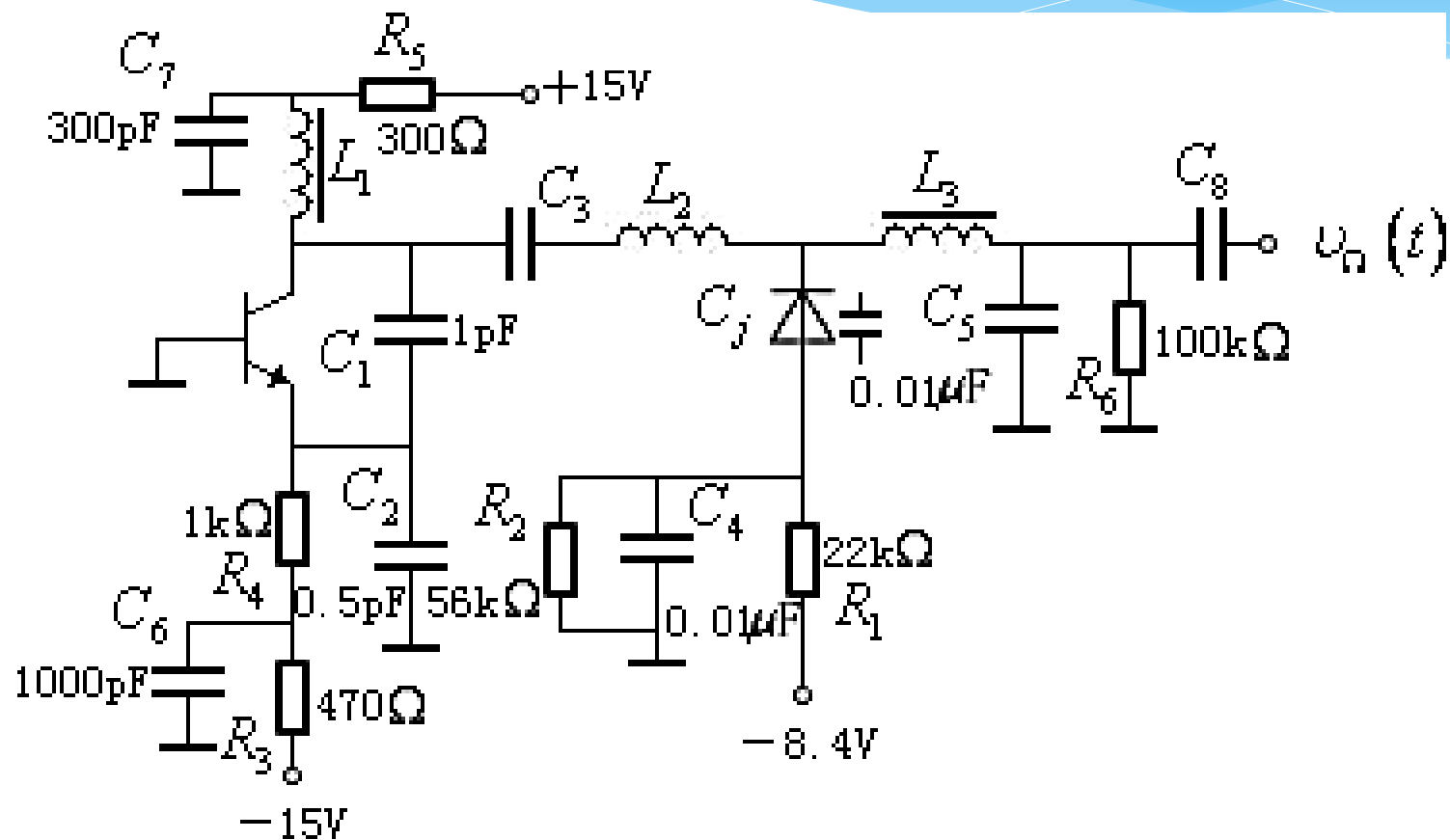
题 7.16 图所示是变容管直接调频电路，其中心频率为  $360\text{MHz}$ ，变容管的  $n=3$ ， $V_B = 0.6\text{V}$ ， $v_\Omega = \cos \Omega t$  (V)。图中  $L_1$  和  $L_3$  为高频扼流圈， $C_3$  为隔直流电容， $C_4$  和  $C_5$  为高频旁路电容。

(1) 分析电路工作原理和各元件的作用；

(2) 调整  $R_2$ ，使加到变容管上的反向偏置电压  $V_Q$  为  $6\text{V}$  时，它所呈现的电容  $C_{jQ} = 20\text{pF}$ ，

试求振荡回路的电感量  $L_2$ ；

(3) 试求最大频偏  $\Delta f_m$  和调制灵敏度  $S_f = \Delta f_m / V_{\Omega m}$ 。



解: (1) 为振荡管 T 的电源电压由  $\pm 15\text{V}$  提供, 变容管反向偏置电压由  $-V_{DD}$  经  $R_1$ 、 $R_2$  分压后提供。振荡回路由  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_j$  和  $L_2$  组成, 电路为变容管接入的电容三点式振荡电路,  $v_\Omega$  调制  $C_j$  使电路输出高频波。

(2) 已知  $f_0 = 360\text{ MHz}$ , 回路总电容  $C_\Sigma = C_1 // C_2 // C_{jQ} = 1\text{pF} // 0.5\text{pF} // 20\text{pF} = 0.328\text{pF}$ ,

$$L_2 = \frac{1}{\omega_0^2 C_\Sigma} = 0.6\ \mu\text{H}$$

(3) 已知  $C_1 = 1\text{pF}$ ,  $C_2 = 0.5\text{pF}$ ,  $p_1 = C_{jQ} / (C_j // C_2) = 60$ ,  $p_2 = 0$ ,

$$p = 1 + p_1 = 61, \quad m = \frac{V_{\Omega m}}{V_B + V_Q} = 0.15, \quad n = 3;$$

$$\Delta f_m = \frac{n}{2} \frac{mf_c}{p} = 1.341\text{ MHz}, \quad S_f = \frac{\Delta f_m}{V_{\Omega m}} = 1.341\text{ MHz/V}$$

## P282, 第7.17题

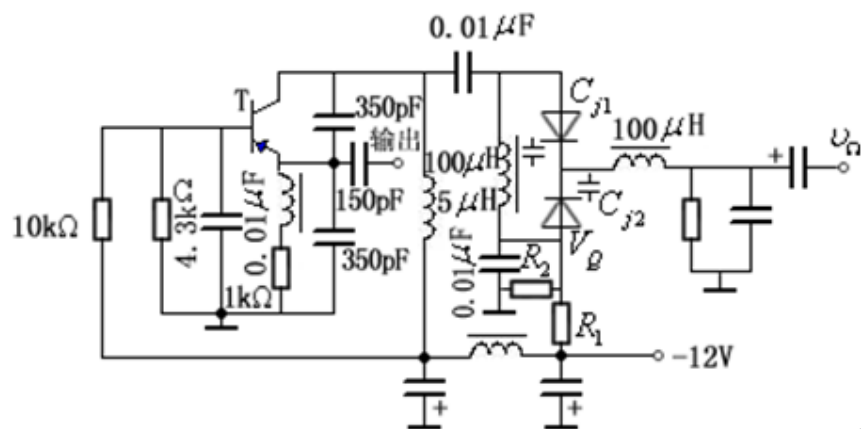
7.17 一变容管直接调制电路，如题 7.17 图所示，已知  $v_{\Omega} = V_{\Omega m} \cos 2\pi \times 10^4 t$  (V)，变容管

结电容  $C_j = 100(V_Q + v_{\Omega})^{-\frac{1}{2}}$  (pF)，调频指数  $M_f = 5\text{rad}$ ， $v_{\Omega} = 0$  时的振荡频率  $f_c = 5\text{MHz}$ 。

(1) 画出该调频振荡器的高频通路、变容管的直流通路和音频通路；

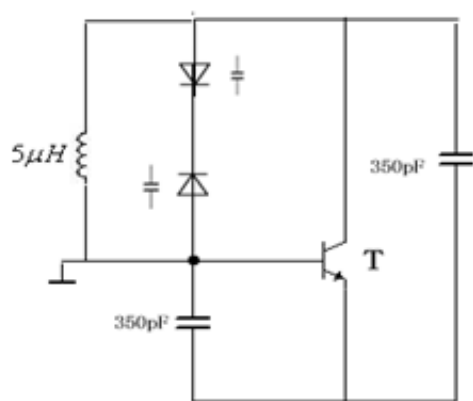
(2) 试求变容管所需直流偏置电压  $V_Q$ ；

(3) 试求最大频偏  $\Delta f_m$  和调制信号电压振幅  $V_{\Omega m}$ 。

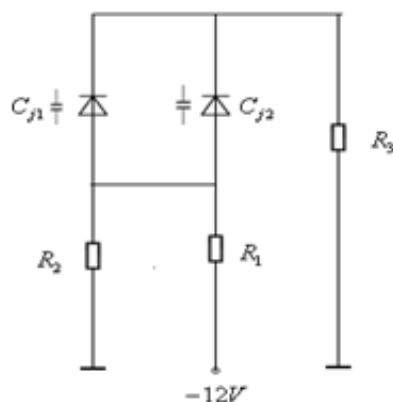


题 7.17 图

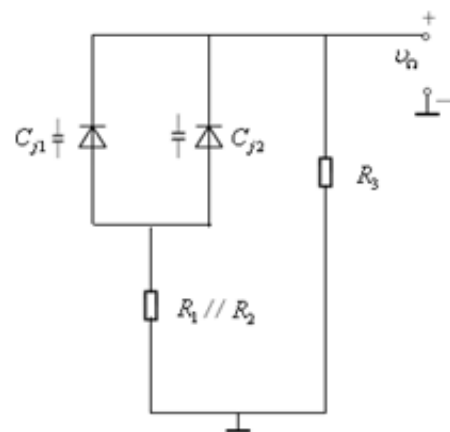
解：(1)  $0.01\mu F$  电容对高频短路，对音频和直流开路， $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  为高频扼流圈，对高频开路，对低频和直流短路，由此画出的高频通路、变容管直流通路及其音频通路分别如图 7.17 题图解 (a)、(b)、(c)所示。



(a)



(b)



(c)

7.17 题图解

(2) 因为  $C_{\Sigma} = \frac{1}{\omega^2 L} = 203\text{pF}$  , 得  $C_{\Sigma} = C'_{jQ} + C_1 // C_2$  , 式中  $C'_{jQ}$  为  $\nu_{\Omega}=0$  时两变容管串

联的结电容,  $C_1=C_2=350\text{pF}$  , 得  $C'_{jQ} = C_{\Sigma} - C_1 // C_2 = 28\text{pF}$ 。

各变容管结电容  $C_{jQ} = 2 C'_{jQ} = 2 \times 28\text{pF} = 56\text{pF}$ 。

根据  $C_{jQ} = 100 (V_Q)^{-\frac{1}{2}}$  , 求得  $V_Q = \left(\frac{100}{C_{jQ}}\right)^2 = 3.19\text{V}$ 。

(3)  $\Delta f_m = M_f F = (5 \times 10^4) H_Z = 50\text{K} H_Z$ 。

已知  $n=1/2$  ,  $m = \frac{V_{\Omega m}}{V_B + V_Q} = \frac{V_{\Omega m}}{V_Q}$  ,  $p_2 = \frac{350\text{pF} / 2}{28\text{pF}} = 6.25$ 。

根据  $\Delta f_m = \frac{nmf}{2(1+p_2)}$  , 求得  $V_{\Omega m} = \frac{2(1+p_2)\Delta f_m V_Q}{nf_c} = 925\text{mV}$ 。

## P283, 第7.19题

题 7.19 图所示为单回路变容二极管调相电路，图中， $C_2$ 、 $C_3$  为高频旁路电容，

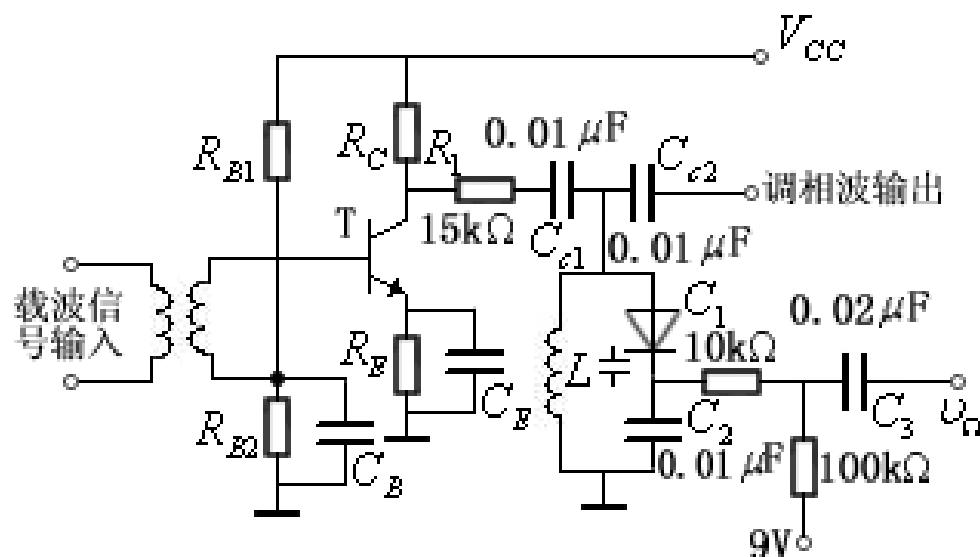
$v_{\Omega}(t) = V_{\Omega m} \cos(2\pi Ft) \text{V}$ ，变容二极管的参数为  $n=2$ ， $V_B = 1\text{V}$ ；回路等效品质因数

$Q_e = 20$ 。试求下列情况时的调相指数  $M_p$  和最大频偏  $\Delta f_m$ 。

(1)  $V_{\Omega m} = 0.1\text{V}$ ， $F = 1000\text{Hz}$ ；

(2)  $V_{\Omega m} = 0.1\text{V}$ ， $F = 2000\text{Hz}$ ；

(3)  $V_{\Omega m} = 0.05\text{V}$ ， $F = 1000\text{Hz}$ 。



解：(1) 已知  $V_{\Omega m}=0.1\text{V}$ ,  $\Omega=2\pi\times 10^3\text{rad/s}$ , 根据  $V_B=1\text{V}$ ,  $V_Q=9\text{V}$ ,

$$\text{求得 } m = \frac{V_{\Omega m}}{V_Q + V_B} = 0.01, \text{ 所以 } M_p = mn Q_e = 0.04\text{rad},$$

$$\Delta \omega_m = M_p \Omega = 2\pi \times 400 \text{ rad/s}, \Delta f_m = 400 \text{ Hz},$$

(2) 已知  $V_{\Omega m}=0.1\text{V}$ ,  $\Omega=4\pi\times 10^3\text{rad/s}$ ,

$$\text{求得 } m = 0.01, M_p = 0.4\text{rad}, \Delta \omega_m = M_p \Omega = 2\pi \times 800 \text{ rad/s}, \Delta f_m = 800 \text{ Hz},$$

(3) 已知  $V_{\Omega m}=0.05\text{V}$ ,  $\Omega=2\pi\times 10^3\text{rad/s}$ ,

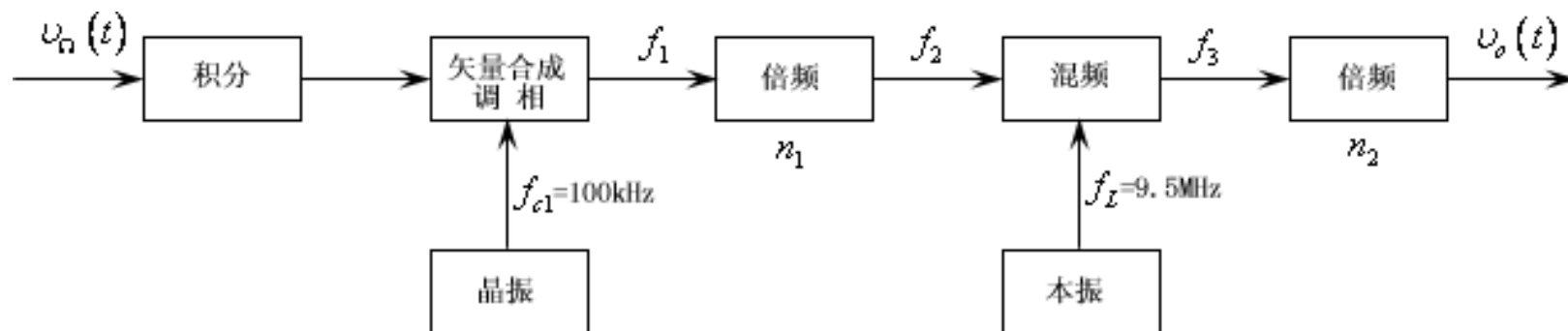
$$\text{求得 } m = \frac{V_{\Omega m}}{V_Q + V_B} = 0.05 \text{ V}, M_p = 0.2 \text{ rad},$$

$$\Delta \omega_m = M_p \Omega = 2\pi \times 200 \text{ rad/s}, \Delta f_m = 200 \text{ Hz},$$



## P283, 第7.21题

7.21 某一由间接调频和倍频、混频组成的调频发射机方框原理图如题 7.21 图所示。要求输出调频波的载波频率  $f_c = 100\text{MHz}$ , 最大频偏  $\Delta f_m = 75\text{kHz}$ , 已知调制信号频率  $F = 100\text{Hz}$ , 混频器输出频率  $f_3 = f_L - f_2$ , 矢量合成法调相器提供的调相指数为  $0.2\text{rad}$ 。试求: (1) 倍频次数  $n_1$  和  $n_2$ ; (2)  $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$  和  $f_3(t)$  的表达式。



**解：**由于电路采用了间接调频，是采用调相电路实现的。对于矢量合成调相其最大线性相位为  $\frac{\pi}{2}$  rad。 **要明确一点：调相电路的调相指数  $M_p$  是电路可以实现的最大相位偏移；**

**调频电路的调频指数  $M_f$  在本质意义上是调相指数，单位也是 rad。**

用它作为间接调频电路时，输出调频波的最大相移即调频指数  $m_f$  同样受到调相特性的限制。 $m_f$  的最大值也只能达到调相时的最大相移  $m_p$ ，有  $m_f = \frac{\Delta\omega_m}{\Omega}$ 。

$$(f_L - n_1 f_{c1}) n_2 = f_c \quad \longrightarrow \quad (9.5 - 0.1 n_1) n_2 = 100$$

最大频偏为  $0.2 \times 100 \times n_1 \times n_2 = 75 \times 10^3 = \Delta f_m \quad \longrightarrow \quad n_1 \times n_2 = 3750$

代入 (1) 得  $9.5 n_2 - 3750 \times 0.1 = 10 \quad \longrightarrow \quad n_1 = 75, \quad n_2 = 50$

$$f_1(t) = f_{c1} + 20 \cos(200\pi t)$$

$$f_2(t) = n_1(f_{c1} + 20 \cos(200\pi t))$$

$$f_3(t) = 9.5 \times 10^6 - n_1(f_{c1} + 20 \cos(200\pi t))$$

## P285, 第7.26题

7.26 鉴频器输入调频信号  $v_s(t) = 3 \cos[2\pi \times 10^6 t + 16 \sin(2\pi \times 10^3 t)]$  V, 鉴频灵敏度

$S_d = 5 \text{ mV/kHz}$ , 线性鉴频范围  $2\Delta f_{\max} = 50 \text{ kHz}$ , 试画出鉴频特性曲线及鉴频输出电压波形。

$$\Delta\phi(t) = 16 \sin(2\pi \times 10^3 t) \text{ rad}$$

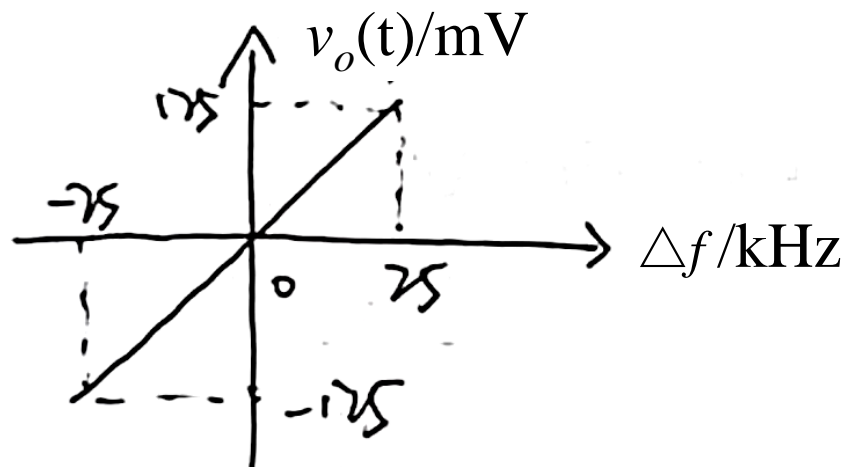
$$\Delta\omega(t) = 16 \times 2\pi \times 10^3 \cos(2\pi \times 10^3 t)$$

$$\Delta f_m = 16 \times 10^3 \text{ Hz}$$

$$2\Delta f_{\max} > 2\Delta f_m$$

可以实现线性鉴频, 最大输出电压为  $V_{om} = S_d \Delta f_m = 80 \text{ mV}$

$$v_o(t) = 80 \cos(2\pi \times 10^3 t) \text{ mV}$$

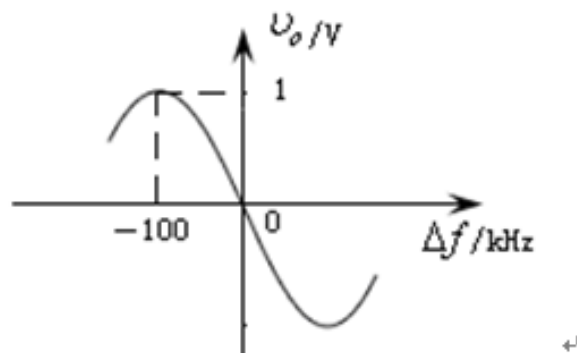


## P285, 第7.28题

7.28 某鉴频器的鉴频特性如题 7.28 图所示。鉴频器的输出电压为  $v_o(t) = \cos 4\pi \times 10^3 t$ 。

(1) 求鉴频灵敏度  $S_d$ ；

(2) 写出输入信号  $v_{FM}(t)$  和原调制信号  $v_{\Omega}(t)$  的表达式； $k_f = 50 \text{ kHz/V}$



(1) 鉴频灵敏度为:  $S_d = 10^{-5} \text{ V/Hz}$

(2)  $v_o(t) = \cos(4\pi \times 10^3 t) = S_d \Delta f(t)$

$$\Delta f(t) = \frac{v_o(t)}{S_d} = 10^5 \cos(4\pi \times 10^3 t) \text{ Hz}$$

$$\omega(t) = 2\pi \Delta f(t) = 2\pi \times 10^5 \cos(4\pi \times 10^3 t) \text{ rad/s}$$

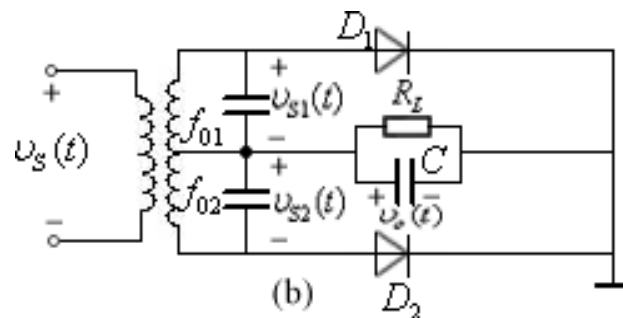
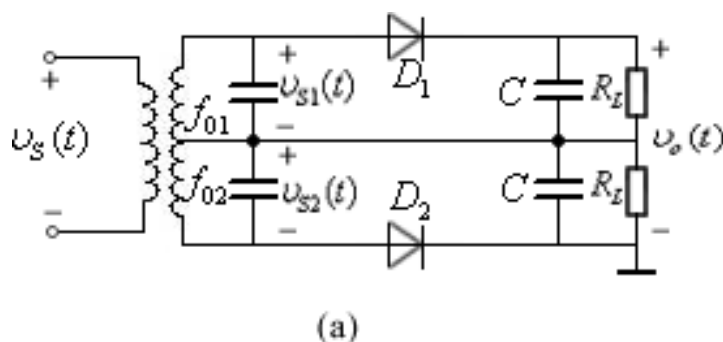
$$\Delta\phi(t) = \int_0^t \Delta\omega(t) dt = 50 \sin(4\pi \times 10^3 t) \text{ rad}$$

$$v_{FM}(t) = V_{cm} \cos(\omega_c t + 50 \sin(4\pi \times 10^3 t))$$

$$v_{\Omega}(t) = \frac{\Delta f(t)}{k_f} = 2 \cos(4\pi \times 10^3 t) \text{ V}$$

## P285, 第7.30题

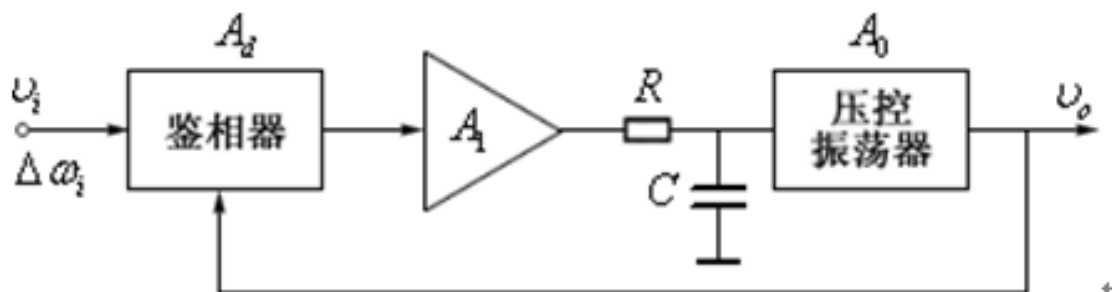
题7.30图所示的两个电路中，试指出，哪个电路能实现包络检波，哪个电路能实现鉴频，相应的 $f_{01}$ 和 $f_{02}$ 如何配置？



**解：**在图（a）所示电路中，输入调幅波时若 $f_{01}=f_{02}=f_c$ ，则由于上、下两检波器输出反映同一包络的解调电压，结果两输出电压相互抵消，输出为零，故不能实现包络检波。但当输入调频波时，若 $|f_{01}-f_c|=|f_{02}-f_c|$ ，则利用两回路变频特性在两边的正、负斜率，得到包络相反的调频调幅波，经检波后，得到叠加的解调电压，故实现斜率鉴频。在图（b）电路中，由于上、下两检波器的输出解调电压叠加，因此，用同样的分析方法可知它不能实现斜率鉴频。但当 $f_{01}=f_{02}=f_c$ 时，它能实现包络检波。

## P323, 第8.14题

8.14 在题 8.14 图所示的锁相环路中, 当输入频率发生突变  $\Delta\omega_i = 100\text{rad/s}$  时, 要求环路的稳态相位误差为  $0.1\text{rad}$ , 试确定放大器的增益  $A_1$ 。已知  $A_d = 25\text{mV/rad}$ ,  $A_0 = 10^3\text{rad/sV}$ ,  $RC = 10^{-3}\text{s}$ 。



题 8.14 图

注：因为稳态相位误差  $0.1 \text{ rad} < \pi/12$ , 所以  $\sin \phi_{e\infty} \approx \phi_{e\infty}$

$$\text{解: } \phi_{e\infty} = \frac{\Delta\omega_i}{A_{\Sigma 0}} = \frac{\Delta\omega_i}{A_o A_1 A_d A_F(0)}, \text{ 因为 } A_F(s) = \frac{\frac{1}{sC}}{R + \frac{1}{sC}} = \frac{1}{1 + sRC}$$

所以  $A_F(0) = 1$

$$A_1 = \frac{\Delta\omega_i}{A_o A_d A_F(0) \phi_{e\infty}} = \frac{100 \text{ rad/s}}{25 \times 10^{-3} \text{ V/rad} \times 10^{-3} \text{ rad/(s} \cdot \text{V)} \times 0.1 \text{ rad}} = 40$$



## P323, 第8.16题

8.16 在某锁相环路中, 鉴相器灵敏度  $A_d = 1\text{V/rad}$ , 压控灵敏度  $A_o = 2\pi \times 10^5 \text{rad/sV}$ , 输入信号频率  $f_i = 1\text{MHz}$ , VCO 的固有频率  $f_o = 1.02\text{MHz}$ 。

(1) 若环路滤波器采用有源比例积分器, 其直流增益  $A_F(0) = 10$ , 可使环路入锁, 试求锁定后的剩余相差, 以及鉴相器与滤波器输出端的直流电压。

(2) 若环路滤波器采用 RC 积分滤波器或无源比例积分滤波器, 试问环路能否锁定?

解：题中  $K_d$  指的是  $\varphi_e = 0$  时的  $\frac{dU_d}{d\varphi_e}$ ，单位是  $V/rad$ 。

### 控制角频差

$$\Delta\omega_o = 2\pi(f_i - f_o) = 2\pi(1 - 1.02) \times 10^6 \text{ rad/s} = 2\pi \times 0.02 \times 10^6 \text{ rad/s}$$

(1) 对正弦鉴相特性， $u_d = K_d \sin \varphi_e = U_d \sin \varphi_e$ ，此时  $K_d$  的单位是  $V$ ，则锁定后的

$$\begin{aligned} \text{剩余相差为 } \varphi_e(\infty) &= \arcsin \frac{\Delta\omega_o}{K_d K_V F(0)} = \arcsin \frac{-2\pi \times 0.02 \times 10^6}{1 \times 2\pi \times 10^6 \times 10} \\ &= \arcsin(-0.02) \approx -0.02 \text{ rad} \end{aligned}$$

鉴相器的直流输出电压为

$$u_d(0) = K_d \sin \varphi_e(\infty) = U_d \sin \varphi_e(\infty) \approx -0.02 \text{ V}$$

滤波器的输出端的直流电压为

$$u_c = u_d(0) \times F(0) \approx -0.02 \times 10 = -0.2 \text{ V}$$

(2) 对于正弦鉴相特性，RC 积分器和无源比例积分器的  $F(0) = 1$

$$\varphi_e(\infty) = \arcsin \frac{2\pi \times (-0.02) \times 10^6}{2\pi \times 10^6 \times 1} = \arcsin(-0.2)$$

环路能够锁定。

## P323, 第8.19题

8.19 某锁相环路 PD 的  $A_d = 2\text{V/rad}$ 。VCO 的  $A_o = 2\pi \times 10^4 \text{ rad/(sV)}$ ,

中心频率  $f_r = 10^3 \text{ kHz}$ 。输入信号频率  $f_i = 1.01 \times 10^6 \text{ Hz}$ ,

滤波器为无源积分滤波器, 试求:

(1) 稳态相位误差。

(2) VCO 的直流控制电压。

(3) 环路的同步范围。

$$(1) \Delta\omega_i = 2\pi(f_i - f_r) = 2\pi \times 10^4 \text{ rad/s}$$

$$\phi_{e\infty} = \arcsin \frac{\Delta\omega_i}{A_d A_o A_F(0)} = \arcsin \frac{2\pi \times 10^4}{2 \times 2\pi \times 10^4} = \frac{\pi}{6}$$

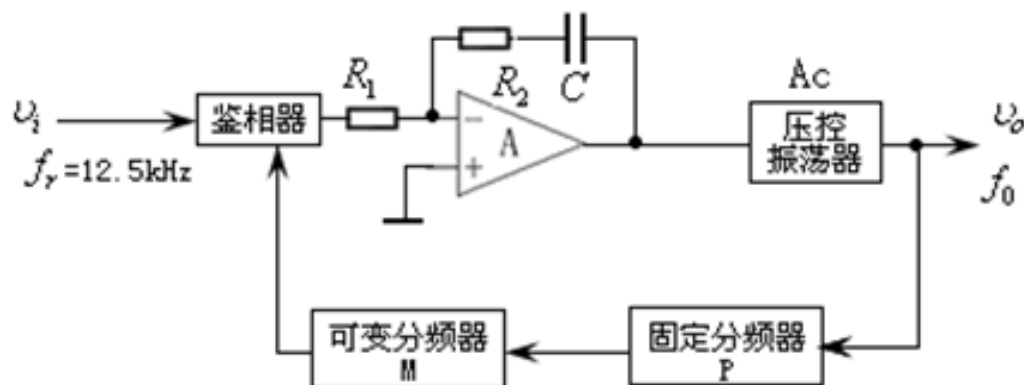
$$(2) v_d = A_d \sin \phi_{e\infty} = 1 \text{ V}$$

$$(3) \Delta\omega_L = \pm A_d A_o A_F(0) = \pm 2 \times 2\pi \times 10^4 = \pm 4\pi \times 10^4 \text{ rad/s}$$

$$\frac{\omega_r - |\Delta\omega_L|}{2\pi} = 0.98 \text{ MHz} \sim \frac{\omega_r + |\Delta\omega_L|}{2\pi} = 1.02 \text{ MHz}$$

## P324, 第8.22题

8.22 锁相可变倍频器如题 8.22 图所示。已知鉴相器的灵敏度  $A_d = 0.1 \text{ V/rad}$ , 压控振荡器的灵敏度  $A_o = 1.1 \times 10^7 \text{ rad/(sV)}$ , 环路输入端的基准信号(由晶振产生)频率  $f_r$  为  $12.5 \text{ kHz}$ , 反馈支路中的固定分频器的分频比  $P = 8$ , 可变分频器的分频比  $M = 653 \sim 793$ 。试求 VCO 输出信号的频率范围及频率间隔。



解：环路锁定时，

$$f_r = \frac{f_o}{MP}$$

所以 VCO 输出信号的频率范围

$$f_o = MPf_r = (653 \sim 793) \times 8 \times 12.5 = (653 \sim 793) \times 100 = 65300 \sim 79300 \text{ (kHz)}$$

$$\text{频率间隔 } \Delta f = 8 \times 12.5 = 100 \text{ (kHz)}$$

## P341, 第9.9题

频率合成器框图如图所示,  $N=200\sim300$ , 混频器取差频。

试求输出频率范围和频率间隔。

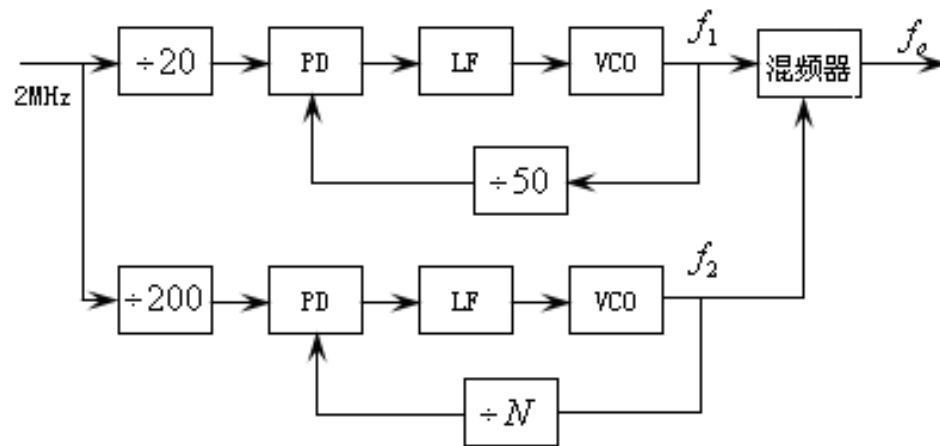
解: 环路锁定时, 有如下关系成立

$$\frac{2}{20} = \frac{f_1}{50} \quad \frac{2}{200} = \frac{f_2}{N}$$

所以

$$f_1 = \frac{2}{20} \times 50 = 5 \text{ (MHz)}$$

$$f_2 = \frac{2}{200} \times N = 0.01N = (2 \sim 3) \text{ (MHz)}$$



输出频率范围  $f_o = f_1 - f_2 = 5 - 0.01N$

频率间隔: 0.01MHz