



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

# 非线性电子线路 第三次习题课 12.17

# Chapter 8



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

8.1 设载波为  $u_c(t) = 10\cos(2\pi \times 10^6 t)$  (V), 基带信号为  $u_n(t) = 2\cos(2\pi \times 10^5 t) + 3\cos(2\pi \times 10^3 t)$  (V)。已知单位电压产生的频偏为  $2\pi \times 10^3$  rad/s, 试写出调频信号  $u_{FM}(t)$  的表达式, 并说明  $u_{FM}(t)$  所含频谱分量。

$$8.1 \quad u_{FM}(t) = 10 \cos[22 \times 10^6 t + m_{f1} \sin(22 \times 10^5 t) + m_{f2} \sin(22 \times 10^3 t)] \quad (V)$$

$$m_{f1} = \frac{k_f U_{n1}}{\Omega_{\max 1}} = \frac{22 \times 10^3 \times 2}{22 \times 10^5} = 0.02, \quad m_{f2} = \frac{k_f U_{n2}}{\Omega_{\max 2}} = \frac{22 \times 10^3 \times 3}{22 \times 10^3} = 3$$

$$\therefore u_{FM}(t) = 10 \cos[22 \times 10^6 t + 0.02 \sin(22 \times 10^5 t) + 3 \sin(22 \times 10^3 t)] \quad (V)$$

频率分量:  $\omega = 22 \times 10^6 \pm n_1 \times 22 \times 10^5 \pm n_2 \times 22 \times 10^3$  其中  $\omega > 0$ ,  $n_1, n_2 = 1, 2, \dots$

# Chapter 8



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

8.2 有一调幅波和一调频波,它们的载频均为 1MHz,基带信号也相同,为  $u_{\Omega}(t) = 0.1 \sin(2\pi \times 10^3 t)$  (V)。调频电路的调制灵敏度为 3kHz/V。

(1)求调幅波的有效频谱宽度  $BW_{AM}$  和调频波的信号带宽  $BW_{CR}$ ;

【Ans. :  $BW_{AM} = 2\text{kHz}$ ,  $BW_{CR} = 2.6\text{kHz}$ 】

(2)若基带信号改成  $u_{\Omega}(t) = 20 \sin(2\pi \times 10^3 t)$  V,再求  $BW_{AM}$ 、 $BW_{CR}$ ;

【Ans. :  $2\text{kHz}$ ;  $122\text{kHz}$ 】

(3)比较(1)(2)结果,你能得到什么结论?

$$8.2 (1) k_f = 3\text{kHz/V}$$

$$BW_{AM} = 2\Omega_{\max} = 2\text{kHz}$$

$$m_f = \frac{k_f U_{\Omega}}{\Omega_{\max}} = \frac{3 \times 0.1}{1} = 0.3$$

$$BW_{CR} = 2(m_f + 1)\Omega_{\max} = 2.6\text{kHz}$$

$$(2) BW_{AM} = 2\Omega_{\max} = 2\text{kHz}$$

$$m_f = \frac{k_f U_{\Omega}}{\Omega_{\max}} = \frac{3 \times 20}{1} = 60$$

$$BW_{CR} = 2(m_f + 1)\Omega_{\max} = 122\text{kHz}$$

(3) 在其余条件不变时,调频波带宽随  $U_{\Omega}$  增加而增加,而调幅波带宽不变。

最好将变化趋势写出来,而不是简单的写有关



# Chapter 8



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

8.4 已知载波信号为  $u_c(t) = 5\cos(100\pi \times 10^6 t) \text{ V}$ , 基带信号为  $u_n(t) = 1.5\cos(4\pi \times 10^3 t) \text{ V}$ 。

(1) 设调频电路的调制灵敏度为  $4\text{ kHz/V}$ , 写出调频波的  $\omega(t)$ 、 $\varphi(t)$  和调频波本身  $u_{\text{FM}}(t)$  的表达式;

【Ans.:  $\omega(t) = 100\pi \times 10^6 + 12\pi \times 10^3 \cos(4\pi \times 10^3 t)$ ;  $\varphi(t) = 100\pi \times 10^6 t + 3\sin(4\pi \times 10^3 t)$ ;  $u_{\text{FM}} = 5\cos\varphi(t) \text{ (V)}$ 】

(2) 设调相电路的调制灵敏度为  $3\text{ rad/V}$ , 写出调相波的  $\omega(t)$ 、 $\varphi(t)$  和调相波本身  $u_{\text{PM}}(t)$  的表达式;

$$8.4(1) \quad k_f = 4\text{ kHz/V} = 82 \times 10^3 \text{ rad/V} \quad , \quad m_f = \frac{k_f U_n}{\Omega_{\max}} = \frac{82 \times 10^3 \times 1.5}{42 \times 10^3} = 3$$

$$\omega(t) = \omega_0 + k_f U_n \cos \Omega_{\max} t = 1002 \times 10^6 + 12 \cos(42 \times 10^3 t)$$

$$\varphi(t) = \omega_0 t + m_f \sin \Omega_{\max} t = 1002 \times 10^6 t + 3 \sin(42 \times 10^3 t)$$

$$u_{\text{FM}}(t) = 5 \cos [1002 \times 10^6 t + 3 \sin(42 \times 10^3 t)] \quad (\text{V})$$

$$(2) \quad k_p = 3\text{ rad/V} \quad m_p = k_p U_n = 4.5$$

$$\omega(t) = \omega_0 - m_p \Omega_{\max} \sin \Omega_{\max} t = 1002 \times 10^6 - 182 \times 10^3 \sin(42 \times 10^3 t)$$

$$\varphi(t) = \omega_0 t + m_p \cos \Omega_{\max} t = 1002 \times 10^6 t + 4.5 \cos(42 \times 10^3 t)$$

$$u_{\text{PM}}(t) = 5 \cos [1002 \times 10^6 t + 4.5 \cos(42 \times 10^3 t)] \quad (\text{V})$$

1101C-08 201412-2500

# Chapter 8



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

- (3) 若基带信号的幅度不变而频率增大 3 倍, 计算上述调角波参数改变前后的带宽;  
(4) 若基带信号的频率不变而幅度增大 3 倍, 计算上述调角波参数改变前后的带宽。

过程为计算增大到3倍, 括号内为增大到4倍的结果

(3) 改变前 FM:  $BW_{CR} = 2(m_f + 1)\Omega_{max} = 16 \text{ kHz}$

PM:  $BW_{CR} = 2(m_p + 1)\Omega_{max} = 22 \text{ kHz}$

改变后: FM:  $m'_f = \frac{m_f}{3} = 1$   $BW_{CR} = 2(m_f + 1)\Omega_{max} \times 3 = 24 \text{ kHz}$  (28)

PM:  $BW_{CR} = 2(m_p + 1)\Omega_{max} \times 3 = 66 \text{ kHz}$  (88)

(4) 改变前: FM:  $BW_{CR} = 16 \text{ kHz}$

PM:  $BW_{CR} = 22 \text{ kHz}$

改变后: FM:  $m'_f = 3m_f = 9$   $BW_{CR} = 2(m_f + 1)\Omega_{max} = 40 \text{ kHz}$  (52)

PM:  $m'_p = 3m_p = 13.5$   $BW_{CR} = 2(m_p + 1)\Omega_{max} = 58 \text{ kHz}$  (76)

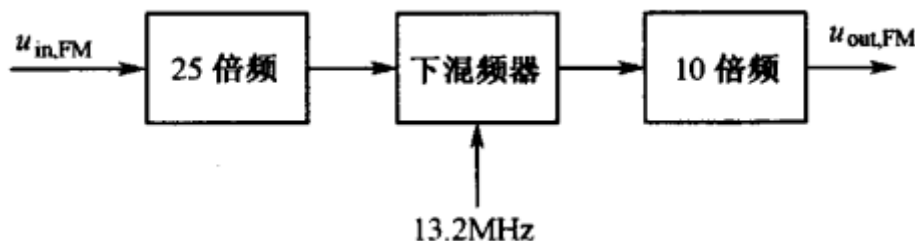
# Chapter 8



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

8.7 如图 E8.3 所示框图为调频发射机中的部分单元。设输入调频信号的参数为：中心频率 100kHz，频偏 180Hz，基带信号频率 2kHz。求输出调频信号参数：载波频率  $f_0$ 、最大频偏  $\Delta f_m$ 、调频指数  $m_f$  和信号带宽  $BW_{CR}$ 。

【Ans. :  $f_0 = 107\text{MHz}$ ,  $\Delta f_m = 45\text{kHz}$ ,  $m_f = 22.5$ ,  $BW_{CR} = 94\text{kHz}$ 】



$$8.7 \quad f_0 = (13.2\text{M} - 25 \times 100\text{k}) \times 10 = 107\text{MHz}$$

$$\Delta f_m = 180 \times 25 \times 10 = 45\text{kHz}$$

$$m_f = \frac{\Delta f_m}{f_{m\max}} = 22.5$$

$$BW_{CR} = 2(m_f + 1)f_{m\max} = 94\text{kHz}$$



# Chapter 8

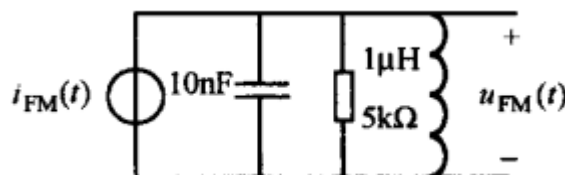


中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

8.8 如图 E8.4 电路, 调频电流源  $i_{FM} = 2\cos(10^7 t + 10^4 \int_0^t \cos 10^3 \tau d\tau) \text{ mA}$ 。判断是否满足准静态条件。

若满足准静态条件, 求回路压降的表达式。

【Ans. :  $u_{FM}(t) = 10\cos(10^7 t + 10^4 \int_0^t \cos 10^3 \tau d\tau) \text{ (V)}$ 】



$$\begin{aligned}
 8.8 \quad \alpha &= \frac{1}{2RC} = 10^4, \quad \Delta\omega = 10^4, \quad \Omega_{\max} = 10^3 \\
 \frac{\Delta\omega \cdot \Omega_{\max}}{\alpha^2} &\ll 1 \quad \text{满足准静态条件} \\
 u_{\text{out}}(t) &= 5 \times 2 \cos(10^7 t + 10^4 \int_0^t \cos 10^3 \tau d\tau - \frac{10^4}{10^4} \cos 10^3 t) \\
 &= 10 \cos(10^7 t + 10^4 \int_0^t \cos 10^3 \tau d\tau - \cos 10^3 t)
 \end{aligned}$$

不可忽略相位变化

中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

(1)说明电路中各元件的作用;

(2) 出振荡器电路、音频电路、变容管直流偏置电路。



各个电容(除  $C^*$ ): 用于选频 (pF 级); 各个电感: 用于选频 (nH 级)

高频扼流圈：隔交通直；三极管：作为放大器

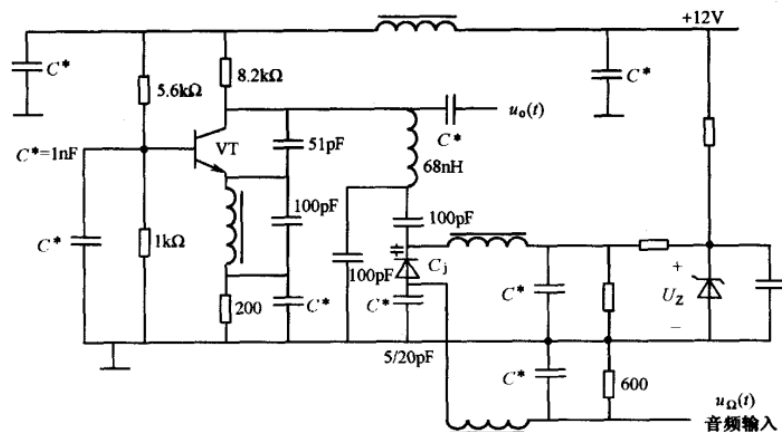
变容=极管:引入音频信号、起调频作用;稳压=极管:为变容=极管提供偏置



# Chapter 8

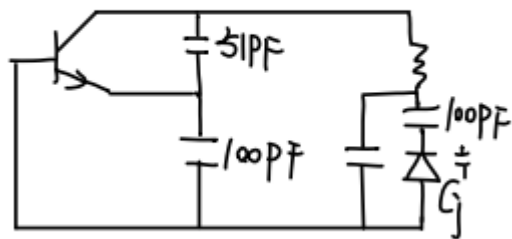


中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

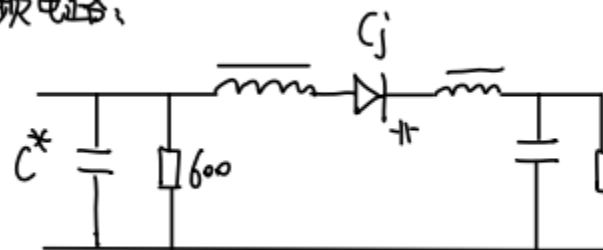


(a)

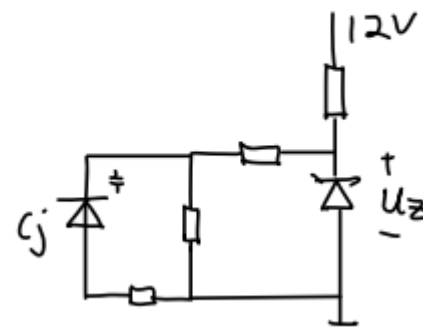
2) 振荡电路:



音频电路:



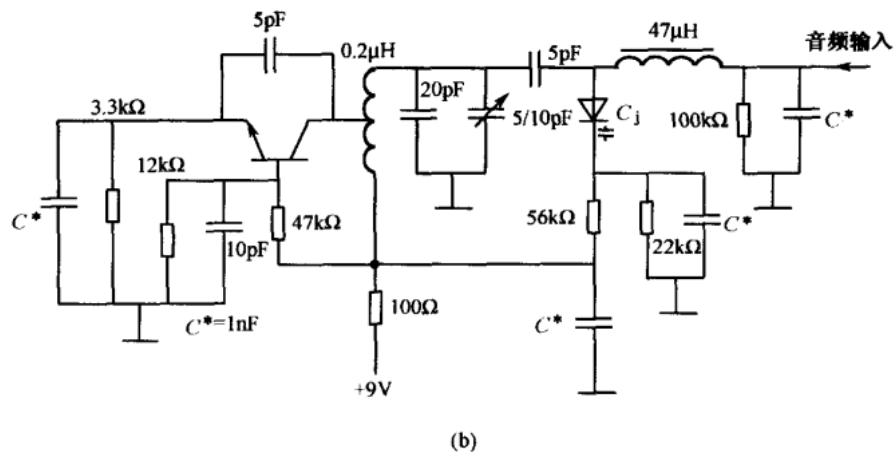
变容管直流偏置电路:



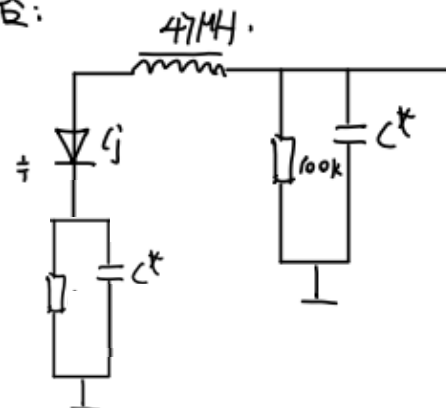
# Chapter 8



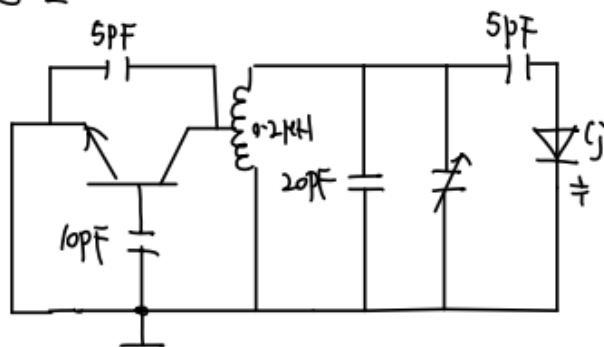
中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China



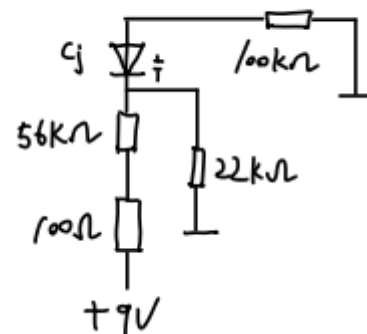
音频电路:



振荡电路:



直流偏置:



# Chapter 8



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

8.11 假定图 E8.7 所示变容管直接调频电路中,变容管的特性为  $C_j = 540(1 + 2u)^{-1.5} \text{ pF}$ , 基带信号为  $135\cos 10^4 t \text{ (mV)}$ , 其他参数见图。计算: 产生的调频波的中心频率  $f_0$ 、最大频偏  $\Delta f$ 、调频指数  $m_f$ 、和信号带宽  $BW_{CR}$ 。

8.11 交流通路

$U_Q = 10 \times \frac{40}{60+40} = 4V$      $C_{jQ} = C_j|_{u=U_Q} = 540(1+8)^{-1.5} = 20\text{pF}$   
 $C_{\Sigma} = 22||22 + 15 + 20||15 = 34.57\text{pF}$   
 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L C_{\Sigma}}} = 60.56\text{MHz}$   
 $C_{open} = (22||22 + 15)||15 = 9.51\text{pF}$   
 $C_{close} = 15\text{pF}$      $U_{\phi} = \frac{1}{2}$   
 $A = \frac{C_{jQ}}{C_{jQ} + C_{open}} = 0.678$      $B = \frac{C_{jQ}}{C_{jQ} + C_{close}} = 0.571$   
 $M = \frac{U_n}{U_Q + U_{\phi}} = 0.03$   
 $D_1 = \frac{1}{2}M\pi(A-B) = 2.41 \times 10^{-3}$   
 $\Delta f = f_0 D_1 = 145.95\text{kHz}$   
 $m_f = \frac{2\pi D_1}{2\pi \Delta f} = 91.66$      $BW_{CR} = 2\Delta f + 1.2\Delta f_{max} = 295.076\text{kHz}$

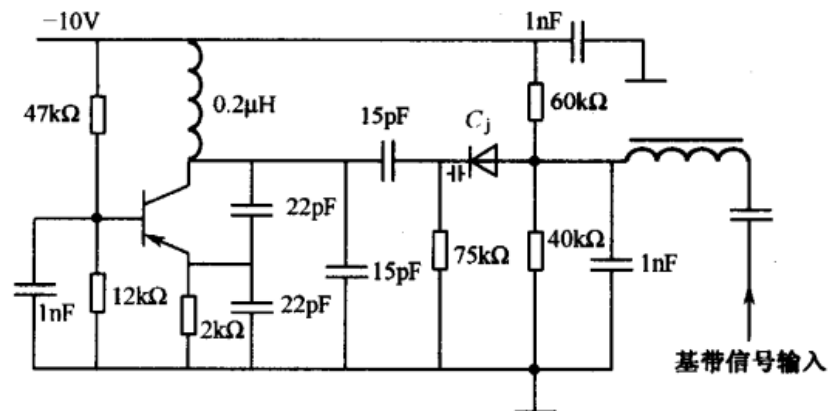


图 E8.7

# Chapter 8



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

8.16 如图 E8.12 所示为简化的相位鉴频器, 设传递函数

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \exp \left\{ j \left[ \frac{\pi}{2} - \arctan \left( \frac{\omega - \omega_0}{\alpha} \right) \right] \right\}$$

(1) 写出  $VD_1, VD_2$  上高频电压的表达式;

(2) 用矢量图法讨论鉴频特性的形状;

(3) 若  $\omega = \omega_0 + \Delta\omega s(t)$ ,  $\Delta\omega \ll \alpha$ , 求输出电压表达式。

【Ans. :  $u_o = -\sqrt{2}U \frac{\Delta\omega}{\alpha} s(t)$ 】

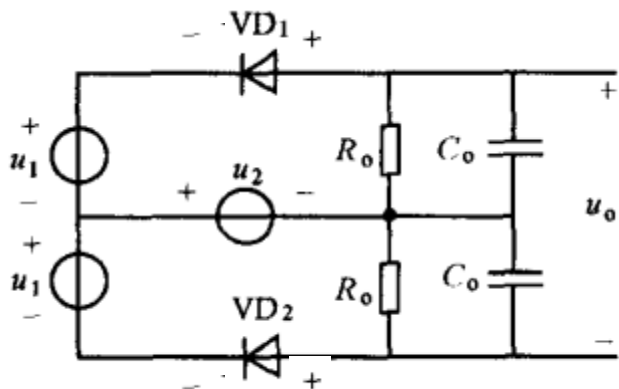


图 E8.12

$$\begin{aligned} 8.16(1) \quad & \begin{cases} \dot{U}_2 + \dot{U}_1 + \dot{U}_{D1} = 0 \\ \dot{U}_2 - \dot{U}_1 + \dot{U}_{D2} = 0 \end{cases} \\ & \therefore \begin{cases} \dot{U}_{D1} = -\dot{U}_1 - \dot{U}_2 \\ \dot{U}_{D2} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 \end{cases} \end{aligned}$$



# Chapter 8



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

8.16 如图 E8.12 所示为简化的相位鉴频器, 设传递函数

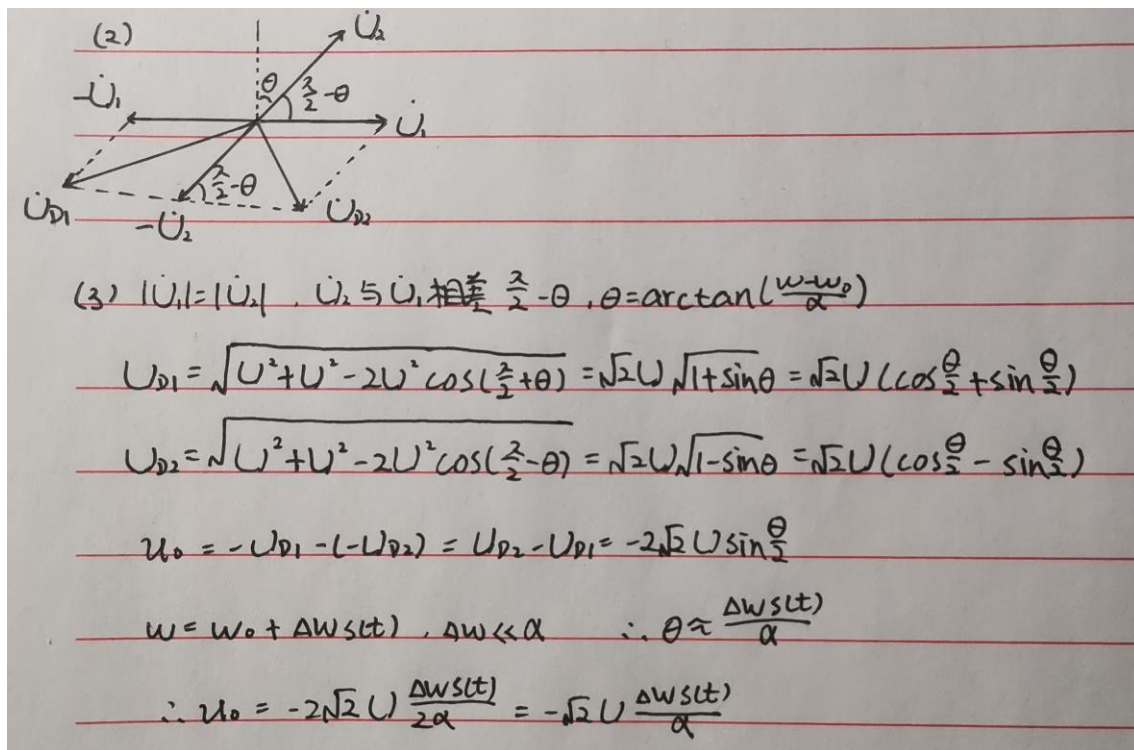
$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \exp \left\{ j \left[ \frac{\pi}{2} - \arctan \left( \frac{\omega - \omega_0}{\alpha} \right) \right] \right\}$$

(1) 写出  $VD_1, VD_2$  上高频电压的表达式;

(2) 用矢量图法讨论鉴频特性的形状;

(3) 若  $\omega = \omega_0 + \Delta\omega s(t)$ ,  $\Delta\omega \ll \alpha$ , 求输出电压表达式。

【Ans. :  $u_o = -\sqrt{2}U \frac{\Delta\omega}{\alpha} s(t)$ 】



# Chapter 8



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

8.17 回答下列问题：

- (1) 如果调相波用鉴频器来解调，一定会失真。为了不失真，解调出的信号应通过什么样的滤波器？
- (2) 如果调频波用鉴相器来解调，一定会失真。为了不失真，解调出的信号应通过什么样的滤波器？

$$8.17 (1) U_{PM}(t) = U_{PM} \cos[\omega_0 t + m_p s(t)]$$

通过鉴频器的微分电路后 已变为  $\propto \omega_0 + m_p s'(t)$

故应通过积分器 (低通滤波器)

$$(2) U_{FM}(t) = U_{FM} \cos[\omega_0 t + \Delta\omega \int_0^t s(\tau) d\tau]$$

通过鉴相器提取相位后 已变为  $\propto \omega_0 t + \Delta\omega \int_0^t s(\tau) d\tau$

故应通过微分器 (高通滤波器)