

一、幅度调制

解：本题考察幅度调制与解调概念，要求确认幅度调制类型，各频谱分量大小，频谱结构和解调实现方法。共 18 分。

1、(6 分)

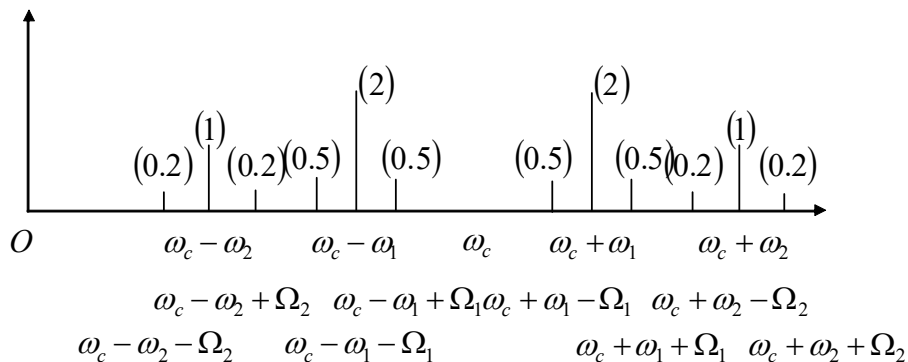
$$v_o(t) = \cos \omega_c t \times ((4 + 2 \cos \Omega_1 t) \cos \omega_1 t + (2 + 0.8 \cos \Omega_2 t) \cos \omega_2 t) \quad (4 \text{ 分}, \text{形式正确即给全分})$$

这是两路基带信号 $v_{f1} = 2 \cos \Omega_1 t$ 、 $v_{f2} = 0.8 \cos \Omega_2 t$ 分别以 ω_1 和 ω_2 为载波实现标准幅度调制，组合后以 ω_c 为载频实现的双边带幅度调制。 (2 分，其它回答符合图示即可给分)

2、频谱图 (6 分)

$$\begin{aligned} v_o(t) &= \cos \omega_c t \times ((4 + 2 \cos \Omega_1 t) \cos \omega_1 t + (2 + 0.8 \cos \Omega_2 t) \cos \omega_2 t) \\ &= \cos \omega_c t \times ((4 \cos \omega_1 t + \cos(\omega_1 + \Omega_1)t + \cos(\omega_1 - \Omega_1)t) + (2 \cos \omega_2 t + 0.4 \cos(\omega_2 + \Omega_2)t + 0.4 \cos(\omega_2 - \Omega_2)t)) \end{aligned}$$

12 个频率点，12 个幅度值 (相对比例正确即可认为正确)，每个 0.25 分，共 6 分。



3、(6 分)

解调电路形式多样，能够实现正确解调，形式合理即可给 6 分。图中有错误，实现方法不合理，酌情扣分。

二、一阶锁相环

解：本题考察锁相环基本概念：稳态相差，控制频差，相图，同步带，频率解调等，共 18 分。

1、(5 分)

初始频差=瞬时频差+控制频差

锁定后，瞬时频差=0，所以初始频差=控制频差，即

(0.5 分)

$$f_{i0} - f_{o0} = 30 \text{ kHz}$$

(0.5 分)

$$f_{i0} = f_{o0} + 30 \text{ kHz} = 1 \text{ MHz} + 30 \text{ kHz} = 1030 \text{ kHz} (= 6468.4 \times 10^3 \text{ rad/s})$$

(1 分)

$$V_p = \frac{\Delta f}{K_\omega} = \frac{30 \text{ kHz}}{30 \text{ kHz/V}} = 1 \text{ V}$$

(1 分)

$$\varphi_{e\infty} = \arcsin \frac{\Delta f}{K_p} = \arcsin \frac{30}{30 \times 2} = \arcsin 0.5 = \frac{\pi}{6} = 0.524 \text{ rad} = 30^\circ$$

(2 分)

2、(5 分)

相图方程为 $\frac{d\varphi_e}{dt} + K_p \sin \varphi_e = \Delta\omega$

其中, $K_p = K_d K_\omega = 2 \times 30k \times 2\pi = 2\pi \times 60k \text{ rad}$, $\Delta\omega = 2\pi \times 30k \text{ rad}$

图中应正确标记 $\varphi_{e\infty}$, K_p 和 $\Delta\omega$ 和 (横轴上下) 箭头方向, 及纵横坐标标记 $\varphi_e, \dot{\varphi}_e$ 。

波形正确给 1.5 分 (正弦波方向反, 给 1 分。), 每个标记 0.5 分, 七个标记共 3.5 分。

3、(3 分)

同步带为 $\Delta f_H = K_p = 30 \times 2 = 60\text{kHz}$ (1.5 分), 所以当输入频率升高到 $f_{i0} = f_{o0} + \Delta f_H = 1060\text{kHz}$ 时, 环路将失锁 (1.5 分)。

4、(5 分)

锁相环不能实现调频波的无失真解调 (1 分)。

原因在于调频波最大频偏为 $\Delta f_m = m_f F = 0.5 \times 25\text{kHz} = 12.5\text{kHz}$ (1 分), 调频波中心频率为 1.05MHz, 因而调频波频率范围为 1.0375–1.0625 (1 分), 而一阶锁相环的同步带及捕捉带均为 0.94–1.06MHz (1 分), 调频波频率超出了锁相环的同步带和捕捉带, 故而无法锁定, 从而无法实现解调 (1 分)。

如果回答: 锁相环可以实现该调频波的解调, 原因解释为: 因为调频信号的载频与 VCO 的自由振荡频率的起始频差 $\Delta f = 50 \times 10^3$ 在捕捉带内, 因而可锁定, 给 1 分, 如果指出调频波最大频偏为 $\Delta f_m = m_f F = 0.5 \times 25\text{kHz} = 12.5\text{kHz}$ 也在捕捉带内, 给 1 分, 如果指出环路带宽 $60\text{kHz} > F (=25\text{kHz})$, 调制信号频率落在 PLL 通带内, 环路能实现调制跟踪, 给 1 分。

如果计算错误, 导致频率范围在 60kHz 频带之外而判断为不能锁定, 给 3 分, 或者根据情况酌情扣分加分。其它情况酌情给分或扣分。

三、放大、混频、滤波、稳定性

解: 本题考察谐振回路及其选频特性, 阻抗匹配概念, 稳定性问题 (负阻、自激振荡) 等基本概念。共 24 分。

1、(6 分)

第一个并联谐振回路为放大器的选频回路 (1 分), 可起到镜像抑制功能 (1 分); 第二个并联选频谐振回路为下变频器输出选频回路 (1 分), 取出中频分量 (0.5 分), 可滤除其它的不必要的频率分量, 尤其是非线性失真分量 (0.5 分), 第三个并联谐振回路为中频放大器输出选频回路 (1 分), 进一步进行中频选频 (0.5 分), 并可用来实现阻抗匹配 (0.5 分)。

2、(5.5 分)

$$f_{IF} = f_{RF} - f_{LO} = 2\text{MHz} \quad (1 \text{ 分})$$

$$C_1 = \frac{1}{L_1 (2\pi f_{RF})^2} = \frac{1}{2.5\mu \times (2 \times 3.14 \times 16M)^2} = 39\text{pF} \quad (1.5 \text{ 分})$$

$$C_2 = \frac{1}{L_2 (2\pi f_{IF})^2} = \frac{1}{31.6\mu \times (2 \times 3.14 \times 2M)^2} = 200\text{pF} \quad (1.5 \text{ 分})$$

$$C_3 = \frac{1}{L_3(2\pi f_{IF})^2} = \frac{1}{25\mu \times (2 \times 3.14 \times 2M)^2} = 253pF \quad (1.5 \text{ 分})$$

3、 (5 分)

晶体管输出电阻通过电感部分接入到输出谐振回路，等效电阻为

$$R'_p = \frac{r_{ce}}{p^2} = 4r_{ce} = 8k\Omega \quad (1.5 \text{ 分})$$

负载电阻通过变压器部分接入到输出谐振回路，等效电阻为

$$R'_L = \frac{R_L}{p^2} = 4R_L \quad (1.5 \text{ 分})$$

为了实现最大功率传输匹配，两个等效电阻应相等，故而 (1 分)

$$R_L = 2k\Omega \quad (1 \text{ 分})$$

上述过程描述清楚，即可给全分。如果没过程，直接给结果，给 2.5 分；答案为 500Ω ，1.5 分； $1k\Omega$ ，1 分； 125Ω ， $32k\Omega$ ，2.5 分；其它情况酌情扣分，减分。

4、 (3.5 分)

自激振荡频率为 2MHz (1.5 分)。这是因为对于第二级中频放大器，其输入谐振回路和输出谐振回路在 2MHz 附近呈现感性，和 T2 的寄生电容 C_{bc} 可构成哈特莱振荡模式 (2 分)。(如果如是回答，也得 2 分：对于 T2 放大管，当其输入和输出回路均为感性负载时，可能处于放大管的条件稳定区，从而有可能出现不稳定现象，这是由于从输入端或输出端看入的电阻呈现出负阻特性。等等其它类似答案。)

5、 (4 分)

可以在晶体管 T2 的三个管脚串联电阻，或在三个管脚间并联电阻。(2 分)

出现自激振荡可以等效为出现负电阻，加入正阻抵消负阻即可消振。(2 分)

其它回答酌情给分，扣分。

四、频率调制器

解： 本题考察振荡器、频率调制器，调频波等基本概念。本题共 19 分。

1、 (2.5 分)

由于这是一个共基组态的三点式振荡器，因而反馈系数

$$F = \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{100}{100 + 100} = 0.5 \quad (2.5 \text{ 分})$$

答案为 1 或 2，给 1 分；其它酌情。

2、 (5 分)

调频波的中心频率 f_c 即为 $v_\Omega = 0$ 时的振荡频率

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_\Sigma}} \quad (0.5 \text{ 分})$$

其中 $C_{\Sigma} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + \frac{C_3 C'_0}{C_3 + C'_0}$ ，式中 C'_0 为只有偏置电压 V_B ($v_{\Omega} = 0$) 时变容管的结电容。

由 $C_1 = C_2 = 100 \text{ pF}$ ， $C_3 = 5 \text{ pF}$ ， $C'_0 = 5 \text{ pF}$ 得

$$C_{\Sigma} = 50 + 2.5 = 52.5 (\text{pF}) \quad (1 \text{ 分})$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{4.8 \times 10^{-6} \times 52.5 \times 10^{-12}}} \approx 10 (\text{MHz}) \quad (1 \text{ 分})$$

$$\Delta f_m = m_f \cdot F \quad (0.5 \text{ 分})$$

由图 3 (b) 频谱图可知

$$B_{W0.1} = 2(m_f + 1)F = 8F$$

$$m_f = 3 \quad (1 \text{ 分})$$

$$\Delta f_m = 3 \times 10^3 (\text{Hz}) = 3 \text{ KHz} \quad (1 \text{ 分})$$

3、(3 分)

输出调频波 $v_o(t)$ 的表示式

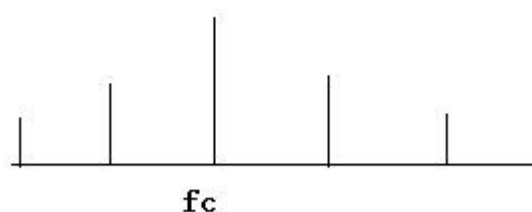
$$v_o(t) = V_{om} \cos(\omega_c t + m_f \sin 2\pi \times 10^3 t) (V) \quad (1 \text{ 分})$$

$$= \cos(2\pi \times 10^7 t + 3 \sin 2\pi \times 10^3 t) (V) \quad (2 \text{ 分})$$

4、(3 分)

如果调制信号的频率增加 3 倍，其它都不变，则频偏不变，调制指数要改变，频谱结构要变。

$$m'_f = \frac{\Delta f}{F'} = \frac{1}{3} m_f = 1, \text{ 频谱结构为} \quad (1 \text{ 分})$$



(2 分)

图形形式正确即可，不要求详尽标记幅度。

5、5.5 分

电路有三处错误 (1 分，判断 3 个却不对应，不给此分)。基极需加旁路电容；变容管应反向偏置或直流偏置电压反相；调制信号加至变容管时用高频扼流圈隔离。(每个错误 1.5 分，共 4.5 分)

五、非线性混频原理

解： 本题考察放大器、变频器、非线性、线性、以及直流偏置点选取等基本问题。本题共 21 分。

1、(5 分)

应取 $V_0 = 0$ (1 分)，此处，代表跨导增益的 a_1 具有极大值，因而作为放大器使用，具有最大的增益 (1 分)，具有最大的线性度 (1 分)。

台劳展开关系： $\tan(X_0 + x) = a_0(X_0) + a_1(X_0)x + a_2(X_0)x^2 + \dots$

$X_0 = 0$ 时， $a_0(X_0) = 0, a_1(X_0) = 1, a_2(X_0) = 0, a_3(X_0) = -0.333, \dots$ (0.5 分)

故而

$$i \approx I_0 \tanh \frac{v}{2v_T} = I_0 a_1 \left(\frac{V_0}{2v_T} \right) \frac{v_s}{2v_T} + I_0 a_3 \left(\frac{V_0}{2v_T} \right) \left(\frac{v_s}{2v_T} \right)^3 = \frac{I_0}{2v_T} v_s - 0.333 \frac{I_0}{(2v_T)^3} v_s^3$$

$$= 0.04 v_s - 5.333 v_s^3$$

(0.5 分)

可见此工作点的跨导增益为 40mS。

(1 分)

2、(3 分)

‘因为差分对管的双曲正切电压电流转移特性为奇函数，台劳展开只有奇次项，没有偶次项，因而不能用差分对管做变频器。’这句话针对特定的直流工作点 $V_0 = 0$ 而言是正确的 (1 分)，如果改变直流工作点位置，偶次项则会出现 (1.5 分)，从而可以作为变频器使用 (0.5 分)。

其它回答，酌情给分。

3、(5 分)

由于 v_L 和 v_s 的幅值都很小，可以认为 $v_L + v_s$ 是输入小信号 (0.5 分)，因而工作点取使得台劳展开系数 a_2 具有最大值的地方 (1 分)，该位置台劳展开的二次项最大，具有最大的变频跨导和变频线性度 (1 分)。

取使得 $a_3 = 0$ 的 V_0 ，即令 $X_0 = \frac{V_0}{2v_T} = -0.657$ ，故而取

$$V_0 = -33mV \quad (0.5 分)$$

此处

$$\tan(-0.657 + x) = -0.577 + 0.668x + 0.385x^2 - 0.257x^4 + \dots$$

故而

$$i = I_0 \tanh \frac{v}{2v_T} \approx I_0 (-0.577 + 0.668x + 0.385x^2)$$

$$= -0.577 I_0 + 0.668(v_s + v_L) \frac{I_0}{2v_T} + 0.385(v_s + v_L)^2 \frac{I_0}{(2v_T)^2} \quad (0.5 分)$$

$$= -0.001 + 0.027(v_s + v_L) + 0.308(v_s + v_L)^2$$

取相乘项中的差频分量为输出，

$$\begin{aligned} i_0 &= 0.308V_{Lm}V_{Sm} \cos(\omega_L - \omega_S)t \\ &= 0.003V_{Sm} \cos(\omega_L - \omega_S)t \end{aligned}$$

可见，变频跨导为 3mS。变频跨导和本振信号幅度成正比关系。（1.5 分）

4、（5 分）

由于本振信号为方波大信号（0.5 分），此时应取直流工作点 $V_0 = -1.5V$ （1 分），如是取法，可使得变频跨导最大，线性度最高（1 分）。

在本振方波激励下，差分对管有两个工作状态，

A. 在方波负半周，直流偏置点移到 $V_0 = -3V$ 位置，此时，

$$\tanh\left(\frac{3+v_s}{2v_T}\right) = \tanh(60 + 0.02\sin\omega_{RF}t) \approx -1,$$

即输出几乎为常值 $i = -I_0$

（0.5 分）

B. 在方波正半周，直流偏置点移到 $V_0 = 0V$ 位置，此时，

$$\tanh x \approx x - 0.333x^3 + \dots$$

$$i \approx I_0 \tanh \frac{v}{2v_T} = I_0 \frac{v_s}{2v_T} - 0.333 \frac{I_0}{(2v_T)^3} v_s^3 + \dots$$

$$= 0.04v_s - 5.333v_s^3$$

输出正常放大

（0.5 分）

因而，变频跨导近似为

（1.5 分）

$$\frac{1}{\pi} 40mS = 12.7mS$$

5、（3 分）

从第 3 问可知，当本振幅度较小时，变频跨导和本振信号幅度成正比关系，因而增加本振幅度和正确设置直流工作点可以提高变频跨导增益（1.5 分）。但是随着本振信号幅值的增加，变频进入非线性工作区，因而变频跨导不会无限增加，直流工作点在 -33mV，本振幅度不能超过 33mV，否则跨导曲线进入非线性区。本振幅度为 10mV 时，变频跨导为 3mS，因而变频跨导最大为 $3mS \times 3.3 = 10mS$ ，这是估算的最大值。事实上，当本振信号大到犹如开关时，变频跨导具有最大值，最大值如第 4 问给出，为 12.7mS（1 分），比放大跨导增益最大值 40mS 低了将近 10dB 左右（0.5 分）。

增加本振幅度，正确设置直流工作点可以提高变频跨导增益，回答出一个给 1 分。两个都回答，1.5 分。