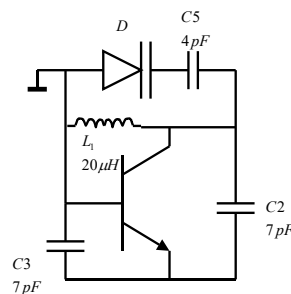


1、频率调制器

解：本题考察变容管频率调制电路，考察振荡器、频率调制器基本概念。共 15 分。

(1) 高频模型：3.5 分：

晶体管，三个电容，一个变容管，一个电感，一个地，共 7 个，错一个扣 0.5 分，包括连接关系，按错各扣 0.5 分。



(2) R4、R5、R6 的作用 (1.5 分)

R5、R6 分压为变容管提供 -4V 的直流偏置电压 (1 分)
R4 是为变容管提供直流偏置通路 (0.5 分)

(3) 中心频率 f_0 ；(3 分)

$$C = (C_2 \text{ 串 } C_3) \text{ 并 } (D \text{ 串 } C_5) = (7p \text{ 串 } 7p) \text{ 并 } (2p \text{ 串 } 4p) = 3.5p \text{ 并 } 1.33p = 4.83pF \quad (1 \text{ 分})$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1 \text{ 分})$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{20\mu \times 4.83p}} = 16.18757MHz \quad (1 \text{ 分})$$

(4) 上下频偏：共 3 分。

$$C_{\pm} = (C_2 \text{ 串 } C_3) \text{ 并 } (D_{\pm} \text{ 串 } C_5) = (7p \text{ 串 } 7p) \text{ 并 } (1p \text{ 串 } 4p) = 3.5p \text{ 并 } 0.8p = 4.3pF \quad (0.5 \text{ 分})$$

$$f_{\pm} = \frac{1}{2\pi\sqrt{20\mu \times 4.3p}} = 17.16212MHz \quad (0.5 \text{ 分})$$

$$\Delta f_{\pm} = f_{\pm} - f_0 = 17.16212 - 16.18757 = 975kHz \quad (0.5 \text{ 分})$$

$$C_{\mp} = (C_2 \text{ 串 } C_3) \text{ 并 } (D_{\mp} \text{ 串 } C_5) = (7p \text{ 串 } 7p) \text{ 并 } (4p \text{ 串 } 4p) = 3.5p \text{ 并 } 2p = 5.5pF \quad (0.5 \text{ 分})$$

$$f_{\mp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{20\mu \times 5.5p}} = 15.17483MHz \quad (0.5 \text{ 分})$$

$$\Delta f_{\mp} = f_0 - f_{\mp} = 16.18757 - 15.17483 = 1013kHz \quad (0.5 \text{ 分})$$

(5) 变容管两端电压的表达式：共 4 分

包括直流电压：-4V

调制信号 $v_f(t) = 2\cos(2\pi \times 10^5 t)(V)$

$$\begin{aligned} \text{调频信号: } v_{FM}(t) &= \frac{0.5V}{0.5} \frac{4}{2+4} \cos\left(2\pi f_0 t + \frac{\Delta f}{F} \sin 2\pi F t + \theta_0\right) \\ &= 0.667 \cos(2\pi \times 16.188 \times 10^6 t + 9.94 \sin(2\pi \times 10^5 t) + \theta_0) \end{aligned}$$

$$v_D(t) = -4 - 2\cos(2\pi \times 10^3 t) - 0.667\cos(2\pi \times 16.188 \times 10^6 t + 9.94\sin(2\pi \times 10^5 t) + \theta_0) \quad (4 \text{ 分})$$

如果答案为 $v_D(t) = -4 - 2\cos(2\pi \times 10^3 t)$ 给 1.5 分

如果答案为 $v_D(t) = -4 - 2\cos(2\pi \times 10^3 t) - V_c \cos(2\pi \times 16.188 \times 10^6 t)$ 给 2 分

如果答案为 $v_D(t) = -4 - 2\cos(2\pi \times 10^3 t) - V_c \cos(2\pi f_0 t + 10\sin(2\pi \times 10^5 t))$ 给 3 分

正负号不对应，不扣分。

其他情况酌情扣分。

2、锁相环

解：本题考察一阶锁相环基本概念，包括捕捉带、频率牵引、环路增益、调制跟踪，调频波解调等。本题共 18 分。

(1) 环路增益：共 2 分

$$K_\omega = 50\text{kHz/V}; \quad K_d = 2\text{V}; \quad K_p = K_\omega K_d = 100\text{kHz}$$

环路增益为 100kHz (2 分)

回答 50kHz 者，给 1 分。

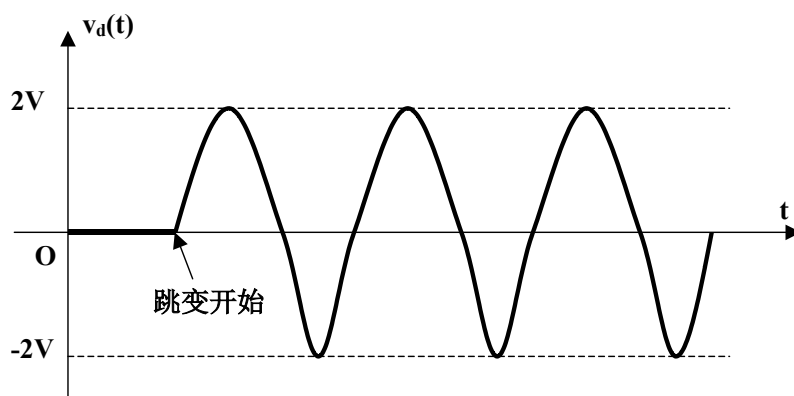
(2) 频率牵引：共 5.5 分

输入信号频率从 90MHz 跳至 90.5MHz 时，环路不能锁定。(0.5 分)

原因：由于环路增益为 100kHz，同时从图示可知，VCO 频率变化范围为 90kHz，，所以捕捉带只有 90kHz，，现在频率变化为 500kHz，超过 90kHz，因此不能锁定。

原因写为 500kHz 大于 100kHz，不扣分。

鉴相器在上述跳变过程中输出电压变化如图所示：(3 分)：跳变前的零值 1 分，跳变后的周期信号形式 1 分，周期信号上多下少 0.5 分，标记信号变化范围 $\pm 2\text{V}$ ，0.5 分。



(3) 同步带：共 2 分

保持环路锁定，环路允许输入信号频率变化的最大频差是 90kHz。这是由于同步带（压控振荡器频率调节范围和环路增益中小的那一个）为 90kHz。（2 分）

写为 100kHz 者给 1.5 分

(4) 调制跟踪：共 8.5 分

输入信号为 $v_i(t) = V_{im} \sin(2\pi \times 90.05 \times 10^6 t + 0.5 \sin(5\pi \times 10^4 t))$

所以输入信号频率为： $f_i = 90\text{MHz} + 50\text{kHz} + 12.5\text{kHz} \cdot \cos(5\pi \times 10^4 t)$

(1) 频率变化范围为 (37.5kHz, 62.5kHz)，在捕捉带 90kHz 之内；同时 (2) 输入调制信号频率为 25kHz，在锁相环带宽 $f_{3dB} = K_p = 100\text{kHz}$ 之内（0.5 分）；所以可以实现调制跟踪（2.5 分）

如果原因写为 50kHz < 90kHz (或 100kHz)，给 1 分

如果原因只写上述两原因之一者，给 2 分。

$$\varphi_{e\infty} = \arcsin \frac{\Delta f}{K_p} = \arcsin \frac{50\text{kHz}}{100\text{kHz}} = \arcsin 0.5 = \frac{\pi}{6} = 30^\circ$$

$$H(s) = \frac{K_p}{s + K_p}$$

$$H(j25\text{kHz}) = \frac{100k}{j25k + 100k} = \frac{4}{j + 4} = 0.9701 \angle -0.245 = 0.9701 \angle -14^\circ$$

$$\theta_o = 0.4851 \sin(5\pi \times 10^4 t - 0.245)$$

$$v_o(t) = V_{om} \cos\left(2\pi \times 90.05 \times 10^6 t - \frac{\pi}{6} + 0.4851 \times \sin(5\pi \times 10^4 t - 0.245)\right) \quad (2.5 \text{ 分})$$

$$(\pi/6 = 0.5236)$$

$$H_e(s) = \frac{s}{s + K_p}$$

$$H_e(j25\text{kHz}) = \frac{j25k}{j25k + 100k} = \frac{j}{j + 4} = 0.2425 \angle 1.326 = 0.2425 \angle 76^\circ$$

$$\theta_e = 0.1213 \sin(5\pi \times 10^4 t + 1.326)$$

$$V_{p0} = K_d \sin \varphi_{e\infty} = 2 \sin 30^\circ = 1V = \frac{\Delta \omega}{K_\omega} = \frac{50\text{kHz}}{50\text{kHz/V}} = 1V$$

$$v_p(t) = V_{p0} + K_d \sin \theta_e = 1 + 2 \sin(0.1213 \sin(5\pi \times 10^4 t + 1.326)) \approx 1 + 0.2425 \sin(5\pi \times 10^4 t + 1.326)$$

(2.5 分)

如果写成 $v_p(t) = 1V$ ，给 1 分。

由此可见：可以实现调频波的解调。

(0.5 分)

V_p 的求解有多种方法，只要最终结果等价即可全分 2.5：

$$v_p(t) \approx 1 + 0.2425 \sin(5\pi \times 10^4 t + 1.326) = 1 + 0.2425 \cos(5\pi \times 10^4 t - 0.245)$$

有多种方法获得同一结果，如果结果均正确，则给全分。

表达式中弧度角度可以不分，只要结果正确，不扣分。

3、晶体振荡器：

解：本题为综合题，综合考察振荡器起振条件、放大器、晶体谐振回路、滤波等基本概念。共 26 分

(1) 各部件作用（共 6 分）

I_0 为偏置电流源，为晶体管提供直流偏置（1 分）；

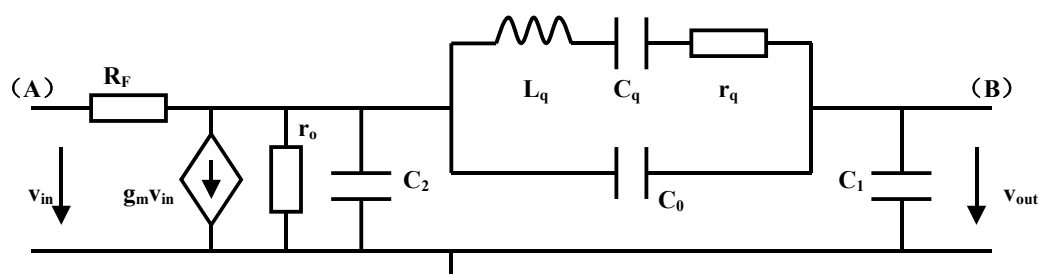
M 为晶体管，为振荡器提供能量补充（为谐振回路提供负阻，将直流能量转换为交流能量），提供振荡限幅作用的非线性（1 分）；

R_F 为为并联负反馈电阻，为晶体管提供直流偏置通路，同时可用于调整放大器放大倍数（调节负阻大小）（1 分）；

解释 1：(a) C_1 、 J 、 C_2 构成电容三点式结构，为放大器提供正反馈通路（实现负阻）（1 分）；(b) 构成 LC 谐振腔，为振荡频率决定器件（1 分）；(c) 晶体在其中起到高 Q 电感作用，实现振荡频率的高稳定度（1 分）；

解释 2：(a) 放大器输出阻抗和 C_2 构成一个移相器，移相 60° 左右，晶体等效电感和电容 C_1 构成一个移相器，移相 120° 左右，晶体管是反相放大器，有 180° 移相，因此 M - C_2 - J - C_1 构成一个 360° 移相正反馈通路（提供负阻）（1 分）；(b) 在特定频点上实现 360° 移相，并满足起振条件，为振荡频率决定元件（1 分）；(c) 晶体实现高稳定度振荡（1 分）

(2) 放大器小信号模型（共 4 分）



R_F , g_m , r_o , C_1 , C_2 , 地，错一个扣 0.5 分，晶体占 1 分，连接关系错，一个扣 0.5 分。

(3) 三个频点表达式，假设电阻对谐振频点的影响可以忽略不计：（共 7 分）

(a) 晶体串联谐振频率 (2 分)

$$f_q = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_q C_q}}$$

(b) 晶体并联谐振频率 f_p , 不考虑晶体外部电容影响 (2 分)

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_q(C_q \text{串} C_0)}}$$

(c) 晶体振荡器振荡频率 (2 分)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_q(C_q \text{串}(C_0 \text{并}(C_1 \text{串} C_2)))}}$$

(d) 三者大小关系 (1 分)

$$f_q < f_0 < f_p$$

(4) 环路增益频率特性曲线 (共 6 分)

f_1 对应 f_0 (1 分)

f_2 对应 f_p (1 分)

在 f_0 频点上, C2-J-C1 谐振回路呈现并联谐振状态, 因而放大器负载具有最大值, 从而放大器具有最大增益。同时, 由于 C2-J-C1 构成的回路是并联谐振, 因此该回路中的谐振电流具有极大值, 该电流在 C1 上建立起来的电压具有最大值, 如图 1b 幅频特性所示, f_1 频点具有最大增益特点, 因而 $f_1 = f_0$, 在该频点上, 晶体等效为高 Q 电感, 晶体配合外部两个电容起到一个并联谐振带通选频作用。(2 分)

在 f_p 频点上, 晶体 J 呈现并联谐振状态, 晶体呈现出一个极大电阻, 该电阻使得放大器输出信号从 C2 通过 J 传递到 C1 受到极大衰减, 因而呈现尖锐的谷值, 如图 1b 幅频特性所示, f_2 频点具有最小增益特点, 因而 $f_2 = f_p$, 该频点上, 晶体的并联谐振回路起到一个陷波器作用。(2 分)

意到即给分, 不要求标准答案。

(5) 振荡频率 (共 3 分)

晶体振荡器的振荡频率为 $f_1 = f_0$ (0.5 分), 这是由于在该频点上, 满足起振条件, $|T(f_1)| > 1$ (0.5 分), $\varphi_T(f_1) = 0$ (0.5 分), 同时满足相位稳定性条件, $\left. \frac{d\varphi_T}{d\omega} \right|_{\omega=2\pi f_1} < 0$ (0.5 分)。

由于晶体在这里起到一个电感作用(振荡频率 f_0 位于晶体串联谐振频点 f_q 和并联谐振频点 f_p 之中)(0.5 分), 因而这是一个并联型晶体振荡器 (0.5 分)。

4、接收机

解: 本题为接收机系统分析综合题, 综合考察接收机结构、锁相环应用, 滤波器应用, 并附带考察接收机灵敏度计算。本题共 26 分。

(1) 频率: 共 4 分

- ① 2MHz (1 分)
- ② 200kHz (1 分)
- ③ 200kHz (1 分)
- ④ 1.8MHz (1 分)

(2) 锁相环的作用: 共 5 分

锁相接收机: 锁相环通过反馈环路的作用, 使得锁相环中的 VCO 跟踪输入信号中心频率的漂移 (1 分), 从而确保第二中频中心频率 200kHz 的稳定性 (1 分), 使得第二中频后的信道选择滤波器带宽可以恰好等于信号带宽 (1 分), 从而有效提高信噪比, 提高接收机灵敏度 (1 分)。锁相环应配置为窄带跟踪环以跟踪载波的缓变 (1 分)。

(3) 5 个滤波器作用, 共 5 分

第一个滤波器: 射频带通滤波器, 信带选择滤波器, 滤除信带外的强干扰, 使得 LNA 不至于进入饱和和非线性放大状态; (1 分)

第二个滤波器: 射频带通滤波器, 镜像抑制滤波器, 抑制镜像干扰信号, 提高中频信噪比; (1 分)

第三个滤波器: 高中频带通滤波器, 第二混频器的镜像抑制滤波器, 抑制镜像干扰信号, 提高中频信噪比; (1 分)

第四个滤波器: 低中频信道选择滤波器, 信道选择, 其带宽等于信号带宽, 将需要的信道从众多信道中选择出来, 利于后续解调; (1 分)

第五个滤波器: 基带低通滤波器, 消除基带信号带宽外的杂波或高频噪声, 利于提高信号质量。(1 分)

(4) 给出图中 5 个滤波器的带宽要求: 共 5 分

共 5200 个可用信道, 总带宽为 26MHz, 因此每个信道宽度为 5kHz。

第一个滤波器: 射频带通滤波器, 信带选择滤波器, 滤除信带外的强干扰: (1) 其通带为 4MHz-30MHz, 带宽为 26MHz, 令所有信道信号通过; 或者 (2) 中心频率随信道开关调整有所变化, 令较多的信道通过。(1 分)

第二个滤波器: 射频带通滤波器, 镜像抑制滤波器, 抑制镜像干扰信号: 由于第一中频为 2MHz, 因此滤波器需要滤除高于射频 4MHz 位置的镜像干扰信号, 所以其中心频率 f_{02} 应随信道开关调整有所变化, 带宽应远高于 5kHz, 通带应包括所选信道, 高于所选信道 4MHz 位置有较大的衰减要求; (1 分)

第三个滤波器：高中频带通滤波器，第二混频的镜像抑制滤波器：其中心频率为固定的 2MHz，带宽应高于 5kHz，对 1.6MHz 位置频率有较大的衰减要求；（1 分）

第四个滤波器：低中频信道选择滤波器，信道选择：中心频率为固定的 200kHz，带宽为 5kHz，带外衰减要求高；（1 分）

第五个滤波器：基带低通滤波器，消除基带信号带宽外的杂波或高频噪声：带宽为 5kHz。（1 分）

意到即给分。

（5）多次变频方案的考虑：共 4 分

采用多级变频方案，主要是为了方便滤波器的实现（1 分）。如果是单级变频，（a）采用高中频方案，则镜像抑制滤波器由于镜像干扰信号远离有用信号而易于实现抑制，但由于中频频率高使得中频信道选择滤波器的 Q 值很高难以实现（1 分），

（b）采用低中频方案，中频信道选择滤波器由于 Q 值较低易于实现，但镜像抑制滤波器难以实现（1 分）。因而采用多级变频方案，前级高中频方案使得镜像抑制滤波器易于实现，后级低中频方案使得信道选择滤波器易于实现。总之，采用多级变频方案，使得接收机滤波器易于实现，整体接收机可实现（1 分）。

意到即可给分。

（6）灵敏度：共 3 分。

根据灵敏度公式，有

$$\begin{aligned} P_{s,\min} &= -174\text{dBm} + NF + 10\log \Delta f / 1\text{Hz} + SNR_{o,\min} \\ &= -174 + 9 + 10\log 5000 + 8 \\ &= -174 + 9 + 37 + 8 \\ &= -120\text{dBm} \end{aligned} \quad (\text{公式 1 分, 过程 1 分})$$

接收机灵敏度为-120dBm （1 分）

给-150dBm 答案的，给 1.5 分

Δf 不取 5kHz 的，扣 1 分。

5、下变频器

解：本题考察基本的线性、非线性、时变性概念，考察开关型下变频器概念。本题共 15 分。

（1）：时变性、非线性概念：共 3 分

理想下变频器可视为时变线性电路，对于图示下变频器电路，其时变性来自转移特性的非线性（0.5 分），体现在本振大信号在直流偏置的配合下，使得电路在一个本振周期的两个半周期上，本振信号控制有源电路分别工作在线性放大区（放大倍数为-10）和饱和区（或截止区，放大倍数为 0），因而放大倍数是时变的（1 分）；其线性来自线性放大区（0.5 分），体现在射频小信号在该区域是线性放大的，因而要求射频小信号满幅度全部位于线性放大区（1 分）。

可有不同表述，意到即可给分。

(2) 直流偏置：共 3 分

为了体现时变性和线性，直流工作点 V_B 的选择应该使得在本振半周期内，射频小信号完全脱离线性放大区 (0.5 分)，而在另外半个周期内，射频小信号必须全部位于线性放大区 (0.5 分)，否则将会出现射频信号的非线性谐波分量。为了做到这一点，显然， V_B 范围应该为 **【0.1V,0.9V】** (1 分) 或者 **【2.1V,2.9V】** (1 分)

(3) 滤波器设置：共 4.5 分

射频信号中心频率为 $f_{RF} = 98\text{MHz}$ ，本振信号频率为 $f_{LO} = 1/10\text{ns} = 100\text{MHz}$ ，因而中频频率为 $f_{IF} = f_{LO} - f_{RF} = 2\text{MHz}$ (1.5 分)，而调频波的带宽为 $BW = 2(m_f + 1)F = 2 \times (5 + 1) \times 1\text{kHz} = 12\text{kHz}$ (1.5 分)，相对带宽只有 0.6%，这是一个窄带信号，因此应选用带通滤波器，其中心频率为 2MHz，带宽为 12kHz (1.5 分)。

如果中心频率和带宽均正确，回答低通滤波器者，给 3.5 分。

(4) 中频输出：共 4.5 分

上述下变频器完成的功能是射频信号和一个开关信号的相乘，为

$$v = S_1(\omega_{LO}t) \cdot (-10) \cdot v_{RF}(t)$$

考虑开关函数的基波分量，则为

$$\begin{aligned} v &= \frac{2}{\pi} \cos \omega_{LO}t \cdot (-10) \cdot V_{RF} \cos[2\pi \times 98 \times 10^6 t + 5 \sin(2\pi \times 10^3 t)] \\ &= -\frac{2}{\pi} \cos(2\pi \times 100 \times 10^6 t) \cdot \cos[2\pi \times 98 \times 10^6 t + 5 \sin(2\pi \times 10^3 t)] \\ &= -\frac{1}{\pi} \cos(2\pi \times 2 \times 10^6 t - 5 \sin(2\pi \times 10^3 t)) - \frac{1}{\pi} \cos[2\pi \times 198 \times 10^6 t + 5 \sin(2\pi \times 10^3 t)] \end{aligned}$$

理想带通取出低频分量，为

$$v_{IF} = -\frac{1}{\pi} \cos(2\pi \times 2 \times 10^6 t - 5 \sin(2\pi \times 10^3 t) + \theta_F) (V) \quad (4.5 \text{ 分})$$

正负号不对应，不扣分。

如果回答 $v_{IF} = V_o \cos(2\pi \times 2 \times 10^6 t - 5 \sin(2\pi \times 10^3 t)) (V)$ 给 2 分