

## 第三章

### 思考题

#### 3-1 什么是调制？为什么要进行调制？

答：调制是指采用调制信号去控制被搭载的高频载波，使载波的某一个或某几个参数按照调制信号的规律而变化，从而携带原始信息。

调制的作用：

- 1) 把原始调制信号转换成适合在信道中传输的形式。
- 2) 将基带信号的低频频谱搬移到高频载波频率上，形成带通型信号频谱，使得所发送的频带信号的频谱匹配于信道的带通特性；
- 3) 通过调制技术将各消息的低通频谱分别搬移到互不重叠的频带上以实现信道的多路复用。
- 4) 通过采用不同的调制方式可以兼顾通信的有效性及可靠性。

#### 3-2 幅度调制有什么共同特点？什么是线性调制？哪些调制属于线性调制？

答：1) 已调信号波形的幅度随基带信号的规律而呈正比例变化；2) 已调信号的频谱是基带信号频谱在频域内的线性搬移，调制前后频谱的形状并未发生变化。

#### 3-3 为什么 AM 调制效率很低？

答：因为在 AM 调制中，已调信号会包含调制信号，同时还会携带有载波信号，其中发射功率的 2/3 用来发射载波信号功率，这部分并不携带信息，拖累了 AM 的调制效率。

#### 3-4 为什么要抑制载波？

答：因为在 AM 调制效率很低，其原因在于有 2/3 的功率用来发射载波信号，因而如抑制载波就可以节省载波功率，解决了 AM 调制的最大软肋。

#### 3-5 SSB 有哪些实现方法？各有何技术难点？

答：1) 滤波法：可以在 DSB 调制系统后增加一个低通或者高通滤波器，将 DSB 信号两个边带中的任意一个边带滤掉而形成 SSB 信号；2) 相移法。滤波法的技术难点是边带滤波器的制作。相移法的难点是宽带移相网络的制作。

#### 3-6 VSB 调制有什么好处？

答：比 DSB 信号占用频的带宽节省许多，但是比 SSB 信号更易实现

另一个方面，若在类似 AM 信号的基础上进行残留边带滤波，残余边带中还保留有部分载频信号，则可很好地解决相干解调的同步问题。

#### 3-7. 要实现 VSB 调制，VSB 滤波器需要满足什么条件？

答：为了保证相干解调的输出无失真地恢复调制信号  $m(t)$ ，必须保证在调制信号的频率范

围内  $|\omega| \leq \omega_H$ ，满足

$$H(\omega + \omega_c) + H(\omega - \omega_c) = \text{常数} \quad |\omega| \leq \omega_H$$

即保证残留边带滤波器传输特性  $H(\omega)$  关于  $\omega_c$  互补对称（奇对称），这样相干解调时才能无失真地从残留边带信号中恢复所需的调制信号。 $\omega_c$  为理想低通滤波器的截止频率。

### 3-8 为什么 DSB 信号的解调器使信噪比改善一倍？

答：因为它采用同步解调，使输入噪声中的一个正交分量  $n_s(t)$  被消除的缘故。

### 3-9 什么是调制制度增益？它有什么作用？

答：为了比较各种调制系统的性能，用输出信噪比和输入信噪比的比值这个相对量指标，这个比值用  $G$  表示，称为**调制制度增益**或简称**制度增益**。 $G$  越大，说明调制制度的抗干扰性能越好。

### 3-10 $G_{\text{DSB}} = 2G_{\text{SSB}}$ ，能否说明 DSB 系统的抗噪声性能比 SSB 系统好？

答：①两者的输入信号功率不同、带宽不同，在相同的噪声功率谱密度条件下，输入噪声功率也不同，所以两者的输出信噪比是在不同条件下得到的。

②在相同条件下，这两种调制方式的输出信噪比是相等的。

③两者的抗噪声性能是相同的。但 SSB 所需的传输带宽仅是 DSB 的一半。

### 3-11 什么是门限效应？AM 信号采用包络检波法解调时为什么会产生门限效应？

答：门限效应就是当包络检波器的输入信噪比降低到一个特定的数值后，检波器输出信噪比出现急剧恶化的一种现象。

因为，门限效应是由包络检波器的非线性解调作用所引起的，而 AM 信号采用了包络检波法，所以会产生门限效应。

### 3-12 FM 系统产生门限效应的主要原因是什么？

答：由于鉴频器的非线性作用。鉴频器也是属于非相干解调，同包络检波器一样，当输入信噪比下降到一定程度时，输出信噪比会急剧恶化，也就是存在门限效应

### 3-13 FM 系统采用预加重和去加重的目的是什么？

答：改善解调器的输出信噪比，特别是信号高频端的信噪比。

### 3-14 什么是频分复用 FDM？

答：FDM 是将传输信道的总带宽划分成若干个子频带（或称子信道），每一个子频带传输 1 路信号。

### 3-15 模拟调制系统中为什么需要载波同步？实现载波同步有哪些方法？载波同步器的性能如何衡量？

答：为了在接收端获取跟发送端同频同相的载波，所以需要载波同步，载波同步分为直接法和插入导频法两类方法。载波同步器的性能常用同步建立时间、同步保持时间和相位误差来衡量。

### 3-16 试从有效性和可靠性两方面比较模拟调制系统(AM、DSB、SSB、VSB、FM)的性能。

解：有效性从高到低：SSB、DSB=AM、FM

可靠性从高到低：FM、DSB=SSB、AM

## 习题

3-1 已知线性调制信号表示式如下：

(1)  $\cos \Omega t \cos \omega_c t$

(2)  $(1 + 0.5 \sin \Omega t) \cos \omega_c t$ 。

式中， $\omega_c = 6\Omega$ 。试分别画出它们的波形图和频谱图。

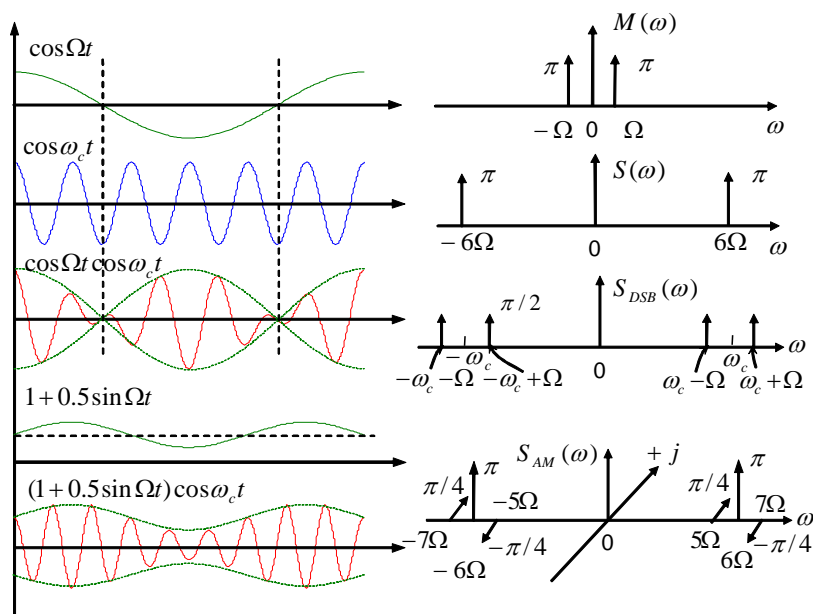
解：(1)  $\because \cos \Omega t \cos \omega_c t = \frac{1}{2} [\cos(\omega_c - \Omega) + \cos(\omega_c + \Omega)]$

$$\therefore F[\cos \Omega t \cos \omega_c t] = \frac{\pi}{2} \{ \delta[\omega - (\omega_c - \Omega)] + \delta[\omega + (\omega_c - \Omega)] + \delta[\omega - (\omega_c + \Omega)] + \delta[\omega + (\omega_c + \Omega)] \}$$

(2)  $\because (1 + 0.5 \sin \Omega t) \cos \omega_c t = \cos \omega_c t + \frac{1}{4} [\sin(\omega_c - \Omega) + \sin(\omega_c + \Omega)]$

$$\therefore F[(1 + 0.5 \sin \Omega t) \cos \omega_c t] = \pi [\delta(\omega - \omega_c) + \delta(\omega + \omega_c)] + \frac{j\pi}{4} \{ \delta[\omega + (\omega_c - \Omega)] - \delta[\omega - (\omega_c - \Omega)] + \delta[\omega + (\omega_c + \Omega)] - \delta[\omega - (\omega_c + \Omega)] \}$$

它们的波形图和频谱图见解图 3-1：



解图 3-1

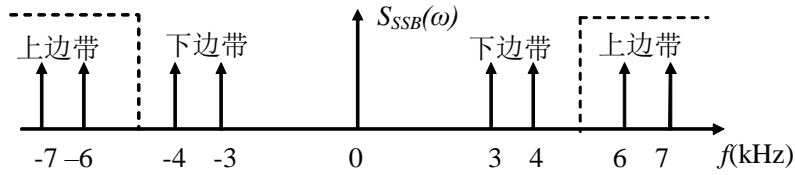
3-2 已知调制信号  $m(t) = \cos(2000\pi t) + \cos(4000\pi t)$ ，载波为  $\cos 104\pi t$ ，进行单边带调制，试确定该单边带信号的表示式，并画出频谱图。

解:  $\hat{m}(t) = \sin(2000\pi t) + \sin(4000\pi t)$

则  $s_{USB}(t) = m(t)\cos\omega_c t - \hat{m}(t)\sin\omega_c t = \cos(12000\pi t) + \cos(14000\pi t)$

$s_{LSB}(t) = m(t)\cos\omega_c t + \hat{m}(t)\sin\omega_c t = \cos(8000\pi t) + \cos(6000\pi t)$

频谱图如解图 3-2 所示



解图 3-2

**3-3** 对单频调制的常规调幅信号进行包络检波。设每个边带的功率为 10 mW, 载波功率为 100 mW, 接收机带通滤波器的带宽为 10 kHz, 信道噪声单边功率谱密度为  $5 \times 10^{-9}$  W/Hz。

(1) 求解调输出信噪比;

(2) 如果改为 DSB, 其性能优于常规调幅多少分贝?

解: (1) 已知常规调幅信号的带宽为  $B_{AM} = 10\text{kHz}$ , 其调制效率和解调信噪比增益分别

为

$$\eta_{AM} = \frac{S_f}{S_f + S_c} = \frac{10 \times 2}{10 \times 2 + 100} = \frac{1}{6}$$

$$G_{AM} = 2\eta_{AM} = \frac{1}{3}$$

输入 SNR 为

$$\frac{S_i}{N_i} = \frac{120 \times 10^{-3}}{5 \times 10^{-9} \times 10 \times 10^3} = 2400$$

输出 SNR 为

$$\frac{S_o}{N_o} = G_{AM} \frac{S_i}{N_i} = \frac{1}{3} \times 2400 = 800$$

(2) 改为 DSB 时, 信号功率相同, 而由于带宽不变, 所以, 输入噪声功率也不变, 所以输入 SNR 亦为:

$$\frac{S_i}{N_i} = \frac{120 \times 10^{-3}}{5 \times 10^{-9} \times 10 \times 10^3} = 2400$$

而输出 SNR 为:

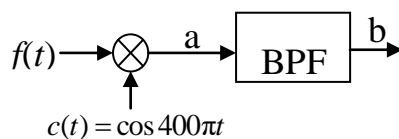
$$\frac{S_o}{N_o} = G_{DSB} \frac{S_i}{N_i} = 2 \times 2400 = 4800$$

所以所求为:

$$\Gamma = 10 \lg \frac{(S_o/N_o)_{DSB}}{(S_o/N_o)_{AM}} = 10 \lg \frac{4800}{800} = 10 \lg 6 = 7.78 \text{ (dB)}$$

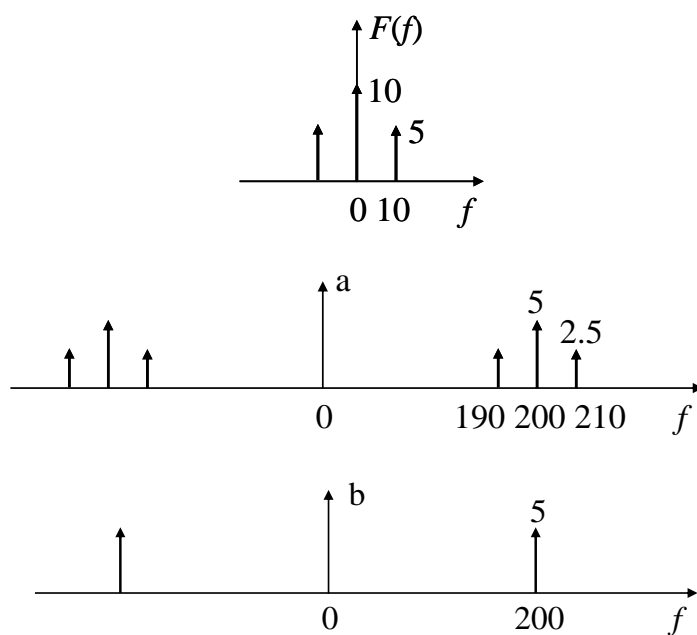
即 DSB 的性能优于常规调幅 7.78dB。

3-4 已知有如题图 3-1 幅度调制系统，其中  $f(t)=10(1+\cos 20\pi t)$ ，BPF 带宽为 10Hz，中心频率  $f_c=200\text{Hz}$ 。分别画出 a、b 点信号的频谱。



题图 3-1

解：  $f(t)$  的频谱以及 a、b 各点的频谱如解图 3-3 所示：



解图 3-3

3-5 对双边带信号和单边带进行相干解调，接收信号功率为  $2\text{mw}$ ，噪声双边功率谱密度为  $2 \times 10^{-3} \mu\text{w}/\text{Hz}$ ，调制信号是最高频率为  $4\text{kHz}$  的低通信号。

(1) 比较解调器输入信噪比；

(2) 比较解调器输出信噪比；

解：SSB 信号的输入信噪比和输出信噪比分别为：

$$\frac{S_i}{N_i} = \frac{S_i}{n_0 B_{\text{SSB}}} = \frac{2 \times 10^{-3}}{2 \times 2 \times 10^{-3} \times 10^{-6} \times 4 \times 10^3} = \frac{1000}{8} = 125$$

$$\frac{S_o}{N_o} = G_{\text{SSB}} \frac{S_i}{N_i} = \frac{S_i}{N_i} = 125$$

DSB 信号的输入信噪比和输出信噪比分别为：

$$\frac{S_i}{N_i} = \frac{S_i}{n_0 B_{DSB}} = \frac{2 \times 10^{-3}}{2 \times 2 \times 10^{-3} \times 10^{-6} \times 2 \times 4 \times 10^3} = \frac{1000}{16} = 62.5$$

$$\frac{S_o}{N_o} = G_{DSB} \frac{S_i}{N_i} = 2 \times 62.5 = 125$$

输入信噪比的比较为  $\left(\frac{S_i}{N_i}\right)_{SSB} : \left(\frac{S_i}{N_i}\right)_{DSB} = 2:1=2$

输出信噪比的比较为  $\left(\frac{S_o}{N_o}\right)_{SSB} : \left(\frac{S_o}{N_o}\right)_{DSB} = 1:1=1$

**3-6** 设某信道具有均匀的双边噪声功率谱密度  $P_n(f) = 0.5 \times 10^{-3} \text{ W/Hz}$ , 在该信道中传输抑制载波的双边带信号, 并设调制信号  $m(t)$  的频带限制在 **5kHz**, 而载波为 **100kHz**, 已调信号的功率为 **10kW**。若接收机的输入信号在加至解调器之前, 先经过一理想带通滤波器滤波, 试问:

- (1) 该理想带通滤波器应具有怎样的传输特性  $H(\omega)$ ;
- (2) 解调器输入端的信噪功率比为多少?
- (3) 解调器输出端的信噪功率比为多少?
- (4) 求出解调器输出端的噪声功率谱密度, 并用图形表示出来。

解: (1) 为了保证信号顺利通过和尽可能地滤除噪声, 带通滤波器的宽度等于已调信号带宽, 即:

$$B = 2f_m = 2 \times 5 = 10 \text{ kHz}$$

其中心频率为 100 kHz, 故有:

$$H(f) = \begin{cases} K, & 95\text{kHz} \leq |f| \leq 105\text{kHz} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

(2) 已知:  $S_i = 10 \text{ kw}$

$$N_i = 2B \cdot P_n(f) = 2 \times 10 \times 10^3 \times 0.5 \times 10^{-3} = 10 \text{ w}$$

故输入信噪比:  $\frac{S_i}{N_i} = 1000$

(3) 因有  $G_{DSB} = 2$

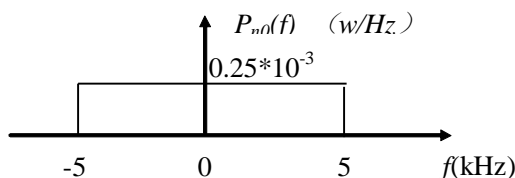
故输出信噪比:  $\frac{S_o}{N_o} = 2 \cdot \frac{S_i}{N_i} = 2000$

(4) 根据双边带解调器的输出噪声与输入噪声功率关系, 有:

$$N_o = \frac{1}{4} N_i = 2.5 \text{ W}$$

$$\text{故: } P_{n_o}(f) = \frac{N_o}{2f_m} = 0.25 \times 10^{-3} \text{ W/Hz} = \frac{1}{2} P_n(f)$$

噪声功率谱密度图如解图 3-4 所示



解图 3-4

**3-7** 设某信道具有均匀的双边噪声功率谱密度  $P_n(f) = 0.5 \times 10^{-3} \text{ W/Hz}$ ，在该信道中传输抑制载波的单边带（上边带）信号，并设调制信号  $m(t)$  的频带限制在 **5kHz**，而载频是 **100kHz**，已调信号功率是 **10kW**。若接收机的输入信号在加至解调器之前，先经过带宽为 **5kHz** 的理想带通滤波器滤波，试问：

- (1) 该理想带通滤波器应具有怎样的传输特性？
- (2) 解调器输入端的信噪功率比为多少？
- (3) 解调器输出端的信噪功率比为多少？

解：1)  $H(f) = \begin{cases} K, & 100\text{kHz} \leq |f| \leq 105\text{kHz} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$

$$2) N_i = 2P_n(f) \cdot f_m = 2 \times 0.5 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^3 = 5 \text{ W}$$

$$\text{故输入信噪比: } \frac{S_i}{N_i} = \frac{10 \times 10^3}{5} = 2000$$

$$3) \text{ 因有 } G_{SSB}=1, \text{ 故输出信噪比: } \frac{S_o}{N_o} = \frac{S_i}{N_i} = 2000$$

**3-8** 设某信道具有均匀的双边噪声功率谱密度  $P_n(f) = 0.5 \times 10^{-3} \text{ W/Hz}$ ，在该信道中传输振幅调制信号，并设调制信号  $m(t)$  的频带限制在 **5kHz**，而载波为 **100kHz**，边带功率为 **10kW**，载波功率为 **40kW**。若接收机的输入信号先经过一个合适的理想带通滤波器，然后加至包络检波器进行解调。试求：

- (1) 解调器输入端的信噪功率比；
- (2) 解调器输出端的信噪功率比；
- (3) 调制制度增益  $G$ 。

解： (1)  $S_i = S_c + S_c S_x = 40 + 10 = 50(kW)$

$$N_i = 2BP_n(f) = 2 \times (2 \times 5 \times 10^3) \times (0.5 \times 10^{-3}) = 10W$$

$$\therefore \frac{S_i}{N_i} = \frac{50kW}{10W} = 5000$$

(2)  $\therefore$  在大信噪比情况下:  $N_0 = \overline{n_c^2(t)} = \overline{n_i^2(t)} = N_i = 10W$

$$S_0 = \overline{m^2(t)} = 2S_i = 20kW$$

$$\therefore \frac{S_0}{N_0} = \frac{20kW}{10W} = 2000$$

(3)  $\therefore$  SSB的调制度增益为:  $G = \frac{S_0/N_0}{S_i/N_i} = \frac{2000}{5000} = \frac{2}{5}$

**3-9 假设音频信号  $x(t)$  经过调制后在 高斯通道进行传输，要求接收机输出信噪比**

**$S_o/N_o = 50dB$ 。已知信道中信号功率损失为  $50dB$ ，信道噪声为带限高斯白噪声，其双**

**边功率谱密度为  $10^{-12}W/Hz$ ，音频信号  $x(t)$  的最高频率  $f_x = 15kHz$ ，并有：**

$$E[x(t)] = 0, E[x^2(t)] = 1/2, |x(t)|_{\max} = 1, \text{求}$$

(1) DSB 调制时，已调信号的传输带宽和平均发送功率。(采用同步解调)

(2) SSB 调制时，已调信号的传输带宽和平均发送功率。(采用同步解调)

(3) 100%AM 调制时，已调信号的传输带宽和平均发送功率。(采用包络解调，且单音调制)

(4) FM 调制时 (调制指数为 5)，已调信号的传输带宽和平均发送功率。(采用鉴频解调，且单音调制)

解 (1) DSB:  $B=2f_x=30kHz$

$$\frac{S_i}{N_i} = \frac{S_0}{N_0} / G_{DSB} = 10^5 / 2 = 5 \times 10^4$$

$$N_i = n_0 B = 2 \times 10^{-12} \times 30 \times 10^3 = 6 \times 10^{-8} (W)$$

$$S_i = 5 \times 10^4 \times 6 \times 10^{-8} = 3 (mW)$$

$$S = 10^5 S_i = 300 (W)$$

(2) SSB:  $B=f_x=15kHz$

$$\frac{S_i}{N_i} = \frac{S_0}{N_0} / G_{SSB} = 10^5 / 1 = 1 \times 10^5$$

$$N_i = n_0 B = 2 \times 10^{-12} \times 15 \times 10^3 = 3 \times 10^{-8} (W)$$



$$S_i = 1 \times 10^5 \times 3 \times 10^{-8} = 3 \text{ (mW)}$$

$$S = 10^5 S_i = 300 \text{ (W)}$$

$$(3) \text{ AM: } B = 2f_x = 30 \text{ kHz}, \quad G_{\text{AM}} = \frac{\overline{2m^2(t)}}{A_0^2 + \overline{m^2(t)}} = \frac{2 \times 1/2}{1 + 1/2} = \frac{2}{3}$$

$$\frac{S_i}{N_i} = \frac{S_0}{N_0} / G_{\text{AM}} = 10^5 / \frac{2}{3} = 1.5 \times 10^5$$

$$N_i = n_0 B = 2 \times 10^{-12} \times 30 \times 10^3 = 6 \times 10^{-8} \text{ (W)}$$

$$S_i = 1.5 \times 10^5 \times 6 \times 10^{-8} = 9 \text{ (mW)}$$

$$S = 10^5 S_i = 900 \text{ (W)}$$

$$(4) \text{ FM: } B = 2(m+1)f_x = 180 \text{ kHz}, \quad G_{\text{FM}} = 3m_f^2(m_f + 1) = 450$$

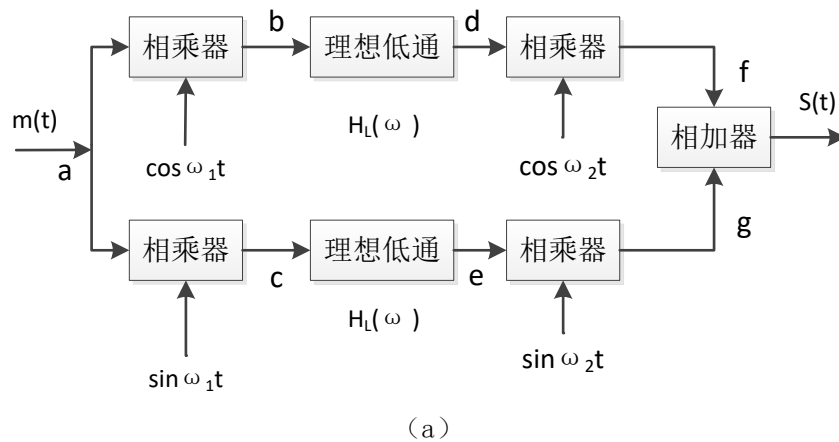
$$\frac{S_i}{N_i} = \frac{S_0}{N_0} / G_{\text{FM}} = 10^5 / 450$$

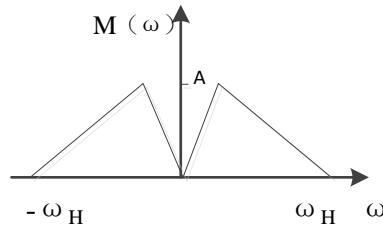
$$N_i = n_0 B = 2 \times 10^{-12} \times 180 \times 10^3 = 36 \times 10^{-8} \text{ (W)}$$

$$S_i = 10^5 / 450 \times 36 \times 10^{-8} = 0.08 \text{ (mW)}$$

$$S = 10^5 S_i = 8 \text{ (W)}$$

3-10 某调制方框图如下题图 3-2(a)所示。已知  $m(t)$  的频谱如下题图 3-2 (b) 所示，载频  $\omega_1 \ll \omega_2$ ,  $\omega_1 > \omega_H$ ，且理想低通滤波器的截止频率为  $\omega_1$ ，试求输出信号  $s(t)$ ，并说明  $s(t)$  为何种已调信号。





(b)

题图 3-2

解：方法一：时域法

两个理想低通输出都是下边带信号，上支路的载波为  $\cos \omega_1 t$ ，下支路的载波为  $\sin \omega_1 t$ 。

$$d(t) = \frac{1}{2} A m(t) \cos \omega_1 t + \frac{1}{2} A \hat{m}(t) \sin \omega_1 t$$

$$e(t) = \frac{1}{2} A m(t) \sin \omega_1 t - \frac{1}{2} A \hat{m}(t) \cos \omega_1 t$$

由此得  $s(t) = f(t) + g(t)$

$$= \frac{1}{2} A m(t) (\cos \omega_1 t + \sin \omega_1 t) \cos \omega_2 t + \frac{1}{2} A \hat{m}(t) (\sin \omega_1 t - \cos \omega_1 t) \sin \omega_2 t$$

$$= \frac{1}{2} A m(t) \cos(\omega_2 - \omega_1) t$$

$$= \frac{1}{2} A \hat{m}(t) \sin(\omega_2 - \omega_1) t$$

可知， $s(t)$  是一个载频为  $\omega_2 - \omega_1$  的上边带信号。

方法二：频域法

上支路各点信号的频谱表达式为

$$S_b(\omega) = \frac{A}{2} [M(\omega + \omega_1) + M(\omega - \omega_1)]$$

$$S_d(\omega) = \frac{A}{2} [M(\omega + \omega_1) + M(\omega - \omega_1)] H_L(\omega)$$

$$S_f(\omega) = \frac{A}{4} [S_d(\omega + \omega_2) + S_d(\omega - \omega_2)]$$

下支路各点信号的频谱表达式为

$$S_c(\omega) = \frac{jA}{2} [M(\omega + \omega_1) - M(\omega - \omega_1)]$$

$$S_e(\omega) = \frac{jA}{2} [M(\omega + \omega_1) - M(\omega - \omega_1)] H_L(\omega)$$

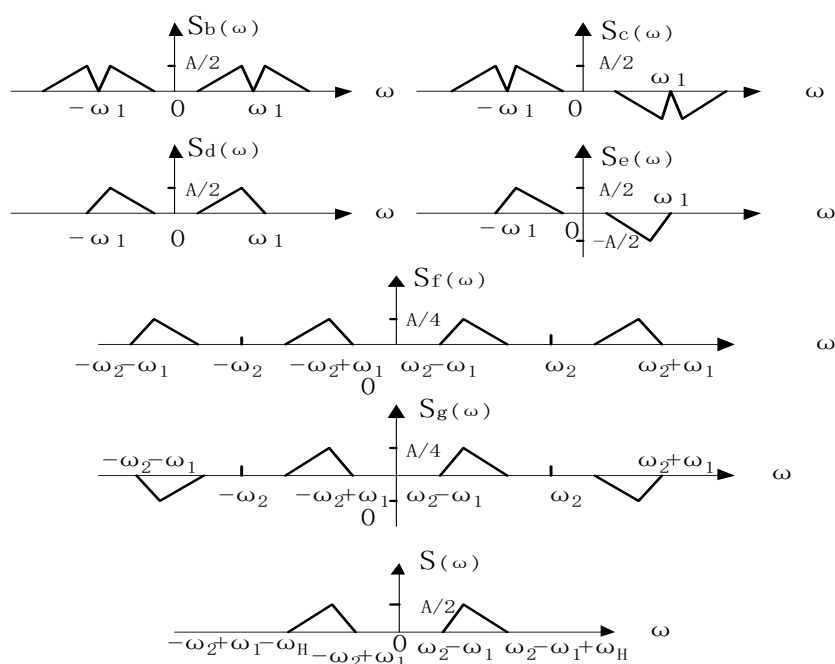
$$S_g(\omega) = \frac{1}{2\pi} S_e(\omega) * \{j\pi [\delta(\omega + \omega_2) - \delta(\omega - \omega_2)]\}$$

$$= \frac{A}{4} \{ [M(\omega + \omega_1) - M(\omega - \omega_1)] H_L(\omega) \} * [\delta(\omega - \omega_2) - \delta(\omega + \omega_2)]$$

$$S(\omega) = S_f(\omega) + S_g(\omega)$$

各点信号频谱图如解图 3-5 所示。由图可知， $s(t)$  是一个载频为  $\omega_2 - \omega_1$  的上边带信号，

$$\text{即 } s(t) = \frac{1}{2} A m(t) \cos(\omega_2 - \omega_1)t - \frac{1}{2} A \hat{m}(t) \sin(\omega_2 - \omega_1)t$$



解图 3-5

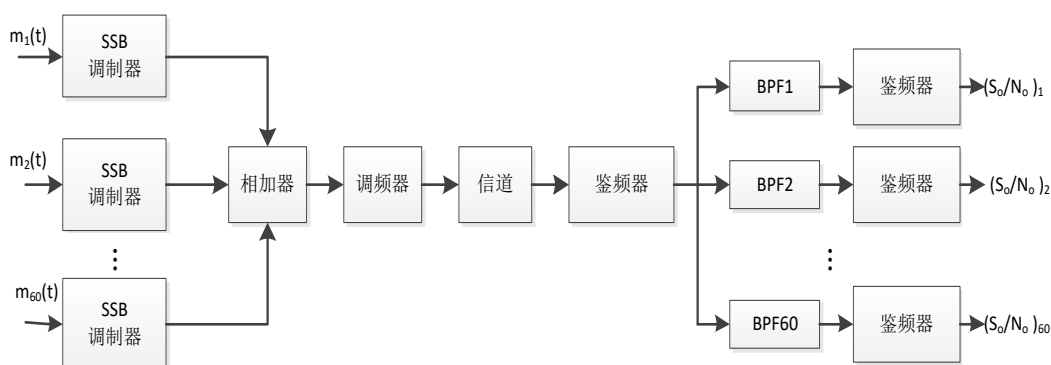
3-11 设信道带宽为  $10\text{MHz}$ ，信号带宽为  $1.5\text{MHz}$ 。对信号分别进行  $DSB$  和  $SSB$  调制，若采用  $FDM$  进行多路传输，试问该信道分别最多可传输几路信号？

解：采用双边带调制，则每路信号带宽为  $W = 2 \times 1.5 = 3\text{MHz}$ ，考虑留出保护带（各路信号频谱之间的空白带）， $10\text{MHz}$  带宽的信道最多可复用 3 路信号。若采用单边带调制，则每路信号带宽为  $W = 1.5\text{MHz}$ ，考虑留出一定的保护带， $10\text{MHz}$  带宽的信道最多可复用 6 路信号。

3-12 设有一个频分多路复用系统，副载波用  $SSB$  调制，主载波用  $FM$  调制。如果有 60 路等幅的音频输入通路，则每路频带限制在  $3.3\text{kHz}$  以下，防护频带为  $0.7\text{kHz}$ 。

- (1) 如果最大频偏为  $800\text{kHz}$ ，试求传输信号的带宽；
- (2) 试分析与第 1 路相比，第 60 路输出信噪比降低的程度(假定鉴频器输入的噪声是白噪声，且解调器中无加重电路)。

思路：本系统的原理方框图解图 3-6 所示。



解图 3-6

因为鉴频器输出噪声功率谱密度与频率平方成正比,所以接收端各个带通滤波器输出噪声功率不同,带通滤波器中心频率越高,输出噪声功率越大。鉴频器输出的各路 SSB 信号功率与它们所处的频率位置无关,因此,各个 SSB 解调器输入信噪比不同。第一路 SSB 信号位于整个频带的最低端,第 60 路 SSB 信号处于频带的最高端。故第 60 路 SSB 解调器输入信噪比最小,而第 1 路信噪比最高。只要求出第 1 路和第 60 路 SSB 解调器输入噪声,就可以确定第 60 路输出信噪比相对于第 1 路信噪比的降低程度。

解: (1) 60 路 SSB 信号的带宽为

$$B = [60 \times (3.3 + 0.7)] \text{ kHz} = 240 \text{ kHz}$$

调频器输入信号的最高频率为

$$f_H = f_L + B$$

当频分复用 SSB 信号的最低频率  $f_L = 0$  时,  $f_H = B = 240 \text{ kHz}$ , FM 信号带宽为

$$B_{FM} = 2(\Delta f + f_H) = [2 \times (800 + 240)] \text{ kHz} = 2080 \text{ kHz}$$

(2) 鉴频器输出噪声功率谱密度为

$$P_n(f) = \begin{cases} \frac{2f^2}{A^2} \cdot n_0, & 0 \leq f \leq 240000 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

第 1 路 SSB 信号的频率范围为  $0 \sim 4000 \text{ Hz}$ , 第 60 路 SSB 信号的频率范围为  $236000 \sim 240000 \text{ Hz}$ 。对  $P_n(f)$  在不同频率范围内积分, 可得第 1 路和第 60 路 SSB 解调器的输入噪声。

$$\begin{aligned} N_{i1} &= \int_0^{4000} P_n(f) df = \int_0^{4000} \frac{2n_0 f^2}{A^2} df \\ &= \frac{2n_0}{3A^2} f^3 \Big|_0^{4000} = 64 \times 10^9 \times \left( \frac{2n_0}{3A^2} \right) \\ N_{i60} &= \int_{23600}^{24000} P_n(f) df = 679744 \times 10^9 \times \left( \frac{2n_0}{3A^2} \right) \end{aligned}$$

与第 1 路相比, 第 60 路输出信噪比降低的分贝数为

$$(10 \cdot \lg \frac{679744}{64}) \text{dB} = (10 \cdot \lg 10621) \text{dB} \approx 40 \text{dB}$$

频分复用 SSB 信号的最低频率  $f_L$  不可能为 0,  $N_{i1}$ 、 $N_{i60}$  随  $f_L$  增加而增加, 但两者之比减小, 即与第 1 路相比, 第 60 路输出信噪比降低的分贝数小于 40 dB。

3-13 已知  $1 \text{kHz}$  正弦信号  $s(t) = 100 \cos(\omega_c t + 25 \cos \omega_m t)$

(1) 若为调载波, 问  $\omega_m$  增加到 5 时的调频指数及宽带;

(2) 若为调相波, 问  $\omega_m$  减小为 1/5 时的调相指数及宽带。

解: (1) 调频: 
$$\beta_{\text{FM}} = \frac{K_{\text{FM}} A}{\omega_m} = \frac{\Delta f_{\text{max}}}{f_m}$$

$\omega_m$  增加到 5 时,  $\beta_{\text{FM}}$  下降 5 倍, 带宽下降 5 倍。

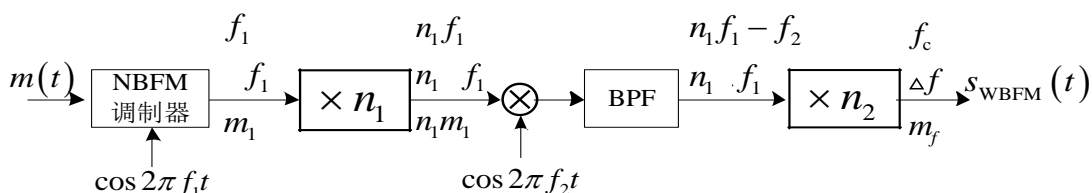
(2) 调相: 
$$\beta_{\text{PM}} = K_{\text{PM}} A_m$$

$\omega_m$  减小为 1/5 时,  $K_{\text{PM}}$  不变, 带宽不变。

3-14 在题图 3-3 所示宽带调频方案中, 设调制信号是  $f_m = 15 \text{kHz}$  的单频余弦信号,

NB FM 信号的载频  $f_1 = 200 \text{kHz}$ , 最大频偏  $f_1 = 25 \text{Hz}$ ; 混频器参考频率

$f_2 = 10.9 \text{MHz}$ , 选择倍频次数  $n_1 = 64$ ,  $n_2 = 48$ 。



题图 3-3

(1) 求 NBFM 信号的调频指数;

(2) 求调频发射信号 (即 WBFM 信号) 的载频、最大频偏和调频指数。

解: (1) NBFM 信号的调频指数为

$$m_1 = \frac{\Delta f_1}{f_m} = \frac{25}{15 \times 10^3} = 1.67 \times 10^{-3}$$

(2) 调频发射信号的载频为

$$f_c = n_2(n_1 f_1 - f_2) = 48 \times (64 \times 200 \times 10^3 - 10.9 \times 10^6) = 91.2 \text{MHz}$$

(3) 最大频偏为

$$\Delta f = n_1 n_2 \Delta f_1 = 64 \times 48 \times 25 = 76.8 \text{ kHz}$$

(4) 调频指数为

$$m_f = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{76.8 \times 10^3}{15 \times 10^3} = 5.12$$

3-15 60 路模拟话音信号采用频分复用方式传输。已知每路话音信号频率范围为  $0 \sim 4\text{kHz}$

(已含防护频带)，副载波采用 SSB 调制，主载波采用 FM 调制，调制指数  $m_f = 2$ 。

(1) 试计算副载波调制合成信号带宽；

(2) 试求信道传输信号带宽。

解：(1) 由于副载波采用 SSB 调制，所以副载波调制合成信号宽度为

$$B_{60} = 4 \times 60 = 240 (\text{kHz})$$

(2) 主载波采用 FM 调制，调制波的总宽度为

$$B = 2(m_f + 1) f_m$$

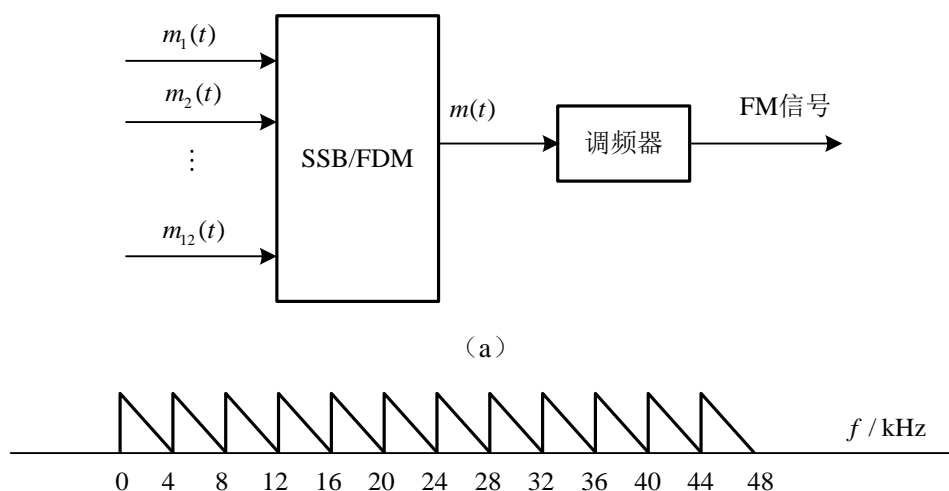
式中  $f_m = B_{60} = 240 (\text{kHz})$ ，所以调频波的总带宽为

$$B = 2 \times 240 \times (2 + 1) = 1440 (\text{kHz})$$

3-16 有 12 路话音信号  $m_1(t), m_2(t), \dots, m_{12}(t)$ ，它们的带宽都限制在  $(0, 4000)\text{Hz}$  范围内。

将这 12 路信号以 SSB/FDM 方式复用为  $m(t)$ ，再将  $m(t)$  通过 FM 方式传输，如题图 3-4 (a)

所示。其中 SSB/FDM 频谱安排如题图 3-4 (b) 所示，已知调频器的载频为  $f_c$ ，最大频偏为  $480\text{kHz}$ 。



(b)

题图 3-4

(1)求 FM 信号的带宽；

(2) 画出解调框图；

(3)假设 FM 信号在信道传输中受到加性白噪声干扰，求鉴频器输出的第一路噪声平均功率与第 12 路噪声平均功率之比。

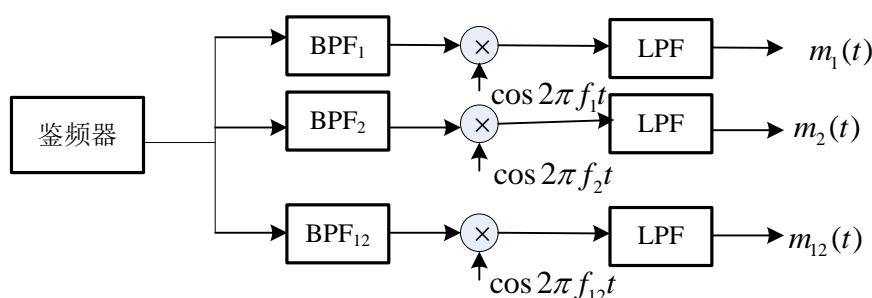
解：

(1)  $m(t)$ 的带宽为 48kHz，所以 FM 信号的带宽近似为  $2 \times (480+48) = 1056\text{kHz}$ 。

(2) 解调框图如下：

$$f_i = 4(i-1)\text{kHz}, \quad i = 1, 2, \dots, 12$$

第  $i$  个 BPF 的通带为  $(f_i, f_i + 4\text{kHz})$ ；LPF 的截止频率是 4kHz。



解图 3-7

(3) 鉴频器输出的噪声功率谱密度与  $f^2$  成正比，即：  $p_{no}(f) = kf^2$ ， $K$  为常数。

落在第 1、12 路频带范围内的输出噪声功率分别为：

$$P_1 = \int_0^{4000} kf^2 df = \frac{(4000)^3 k}{3} = \frac{4^3 \times 10^9}{3} k$$

$$P_{12} = \int_{244000}^{48000} kf^2 df = \frac{(48000^3 - 244000^3)k}{3} = \frac{(48^3 - 244^3) \times 10^9}{3} k$$

$$\text{所以 } \frac{P_{12}}{P_1} = \frac{(48^3 - 244^3) \times 10^9}{4^3} = 12^3 - 11^3 = 397, \text{ 相当于 } 26\text{dB}$$