

第三章 模拟调制系统

思考题

- 3-1 什么是线性调制？常见的线性调制有哪些？
- 3-2 残留边带滤波器的传输特性应如何？为什么？
- 3-3 什么是调制制度增益？其物理意义如何？
- 3-4 双边带调制系统解调器的输入信号功率为什么和载波功率无关？
- 3-5 如何比较两个系统的抗噪声性能？
- 3-6 DSB 调制系统和 SSB 调制系统的抗噪声性能是否相同？为什么？
- 3-7 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？
- 3-8 在小噪声情况下，试比较 AM 系统和 FM 系统抗噪声性能的优劣。
- 3-9 FM 系统产生门限效应的主要原因是什么？
- 3-10 FM 系统调制制度增益和信号带宽的关系如何？这一关系说明什么问题？
- 3-11 什么是频分复用？
- 3-12 什么是复合调制？什么是多级调制？

习题

3-1 已知线性调制信号 $m(t)$ 表示式如下：

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

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

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

3-2 根据图 T3-2 所示的调制信号波形，试画出 DSB 及 AM 信号的波形图，并比较它们分别通过包络检波器后的波形差别。

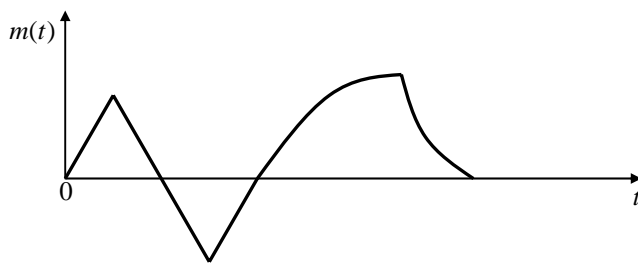


图 T3-2 调制信号波形

- 3-3 已知调制信号 $m(t) = \cos(2000\pi t) + \cos(4000\pi t)$ 载波为 $\cos 10^4 \pi t$ ，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。
- 3-4 将调幅波通过残留边带滤波器产生残留边带信号。若此滤波器的传输函数 $H(\omega)$ 如图 T3-4 所示（斜线段为直线）。当调制信号为 $m(t) = A[\sin 100\pi t + \sin 6000\pi t]$ 时，试确

定所得残留边带信号的表示式。

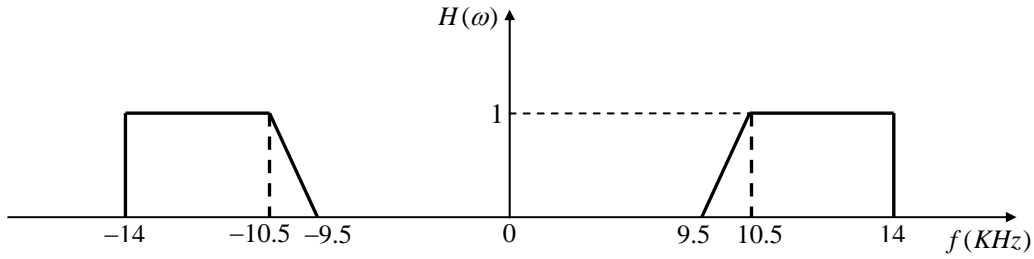


图 T3-4 滤波器的传输函数

3-5 某调制方框图如图 T3-5 (b) 所示。已知 $m(t)$ 的频谱如图 T3-5 (a), 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 ω_1 , 试求输出信号 $s(t)$, 并说明 $s(t)$ 为何种已调制信号。

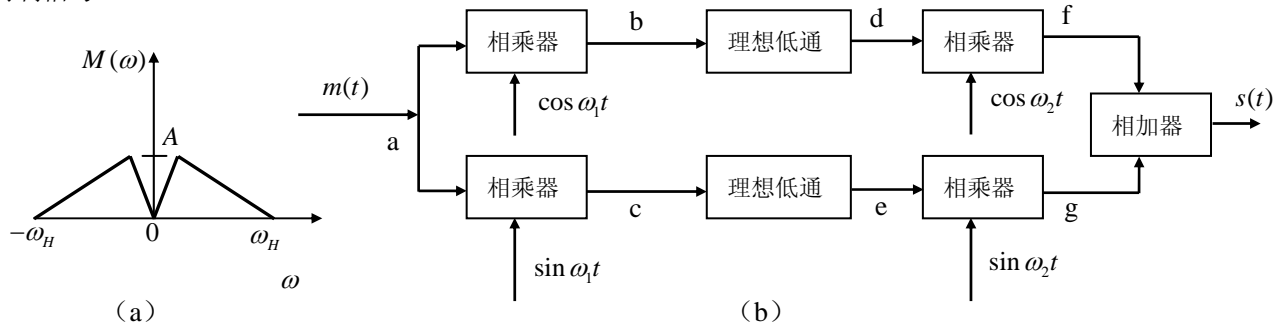


图 T3-5 (a) $m(t)$ 的频谱; (b) 调制方框图

3-6 某调制系统如图 T3-6 所示。为了在输出端同时分别得到 $f_1(t)$ 及 $f_2(t)$, 试确定接收端的 $c_1(t)$ 及 $c_2(t)$ 。

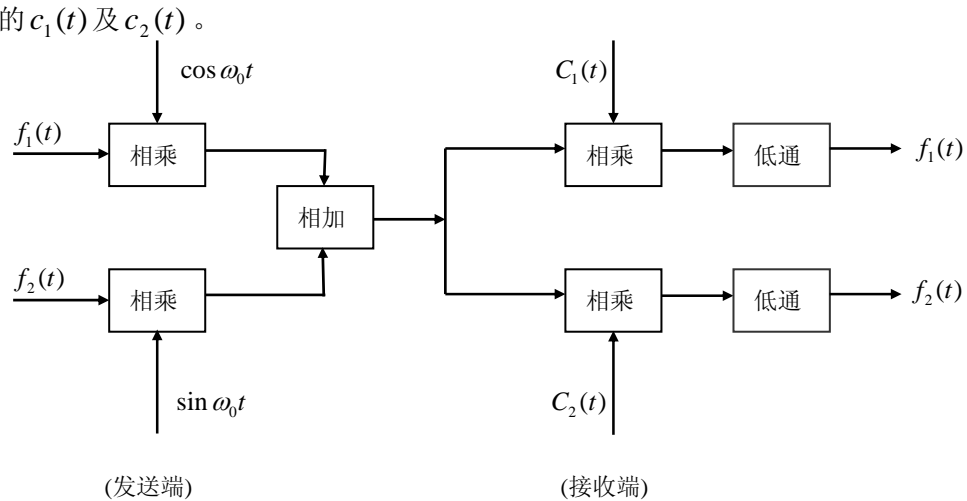


图 T3-6 调制系统

3-7 设某信道具有均匀的双边噪声功率谱密度 $P_n(f) = 0.5 \times 10^{-3} \text{ W/Hz}$, 在该信道中传输振幅调制信号, 并设调制信号 $m(t)$ 的频带限制于 5 KHz , 载频是 100 KHz , 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理的理想带通滤波器，然后再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) 制度增益 G 。

3-8 设某信道具有均匀的双边噪声功率谱密度 $P_n(f) = 0.5 \times 10^{-3} W/Hz$ ，在该信道中传输抑制载波的双边带信号，并将调制信号 $m(t)$ 的频带限制在 $5KHz$ ，而载波频率为 $100KHz$ ，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，先经过带宽为 $10KHz$ 的一理想带通滤波器滤波，试问：

- (1) 该理想带通滤波器中心频率为多大？
- (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。

3-9 设一宽带频率调制系统，载波振幅为 $100V$ 、频率为 $100MHz$ ，调制信号 $m(t)$ 的频带限制于 $5KHz$ ， $\overline{m^2(t)} = 5000V^2$ ， $K_f = 500\pi rad/(s \cdot V)$ ，最大频偏 $\Delta f = 75KHz$ ，并设信道中噪声功率谱密度大均匀的，其 $P_n(f) = 10^{-3} W/Hz$ （单边谱），试求：

- (1) 接收机输入端理想带通滤波器的传输特性 $H(\omega)$ ；
- (2) 解调器输入端的信噪功率比；
- (3) 解调器输出端的信噪功率比；
- (4) 若 $m(t)$ 以振幅调制方法传输，并以包络检波器检波，试比较在输出信噪比和所需带宽方面与频率调制系统有何不同？

3-10 若对某一信号用 DSB 进行传输，设加至发射机的调制信号 $m(t)$ 之功率谱密度为

$$P_m(f) = \begin{cases} \frac{n_m}{2} \cdot \frac{|f|}{f_m}, & |f| \leq f_m \\ 0, & |f| > f_m \end{cases} \quad (\text{公式 T3-10})$$

试求：

- (1) 接收机的输入信号功率
- (2) 接收机的输出信号功率

若叠加于 DSB 信号的白噪声具有双边功率谱密度 $n_0/2$ ，设解调器的输出端接有截止频率为 f_m 的理想低通滤波器，那么，输出信噪比是多少？

3-11 某发射机由放大器，倍频器和混频器组成，如图 T3-11 所示，已知输入信号为调频信号，此调频信号的载波频率为 $2MHz$ ，调制信号最高频率为 $10KHz$ ，最大频偏为 $300KHz$ 。试求两个放大器的中心频率和要求的通带宽度各为多少（混频后取和频）？

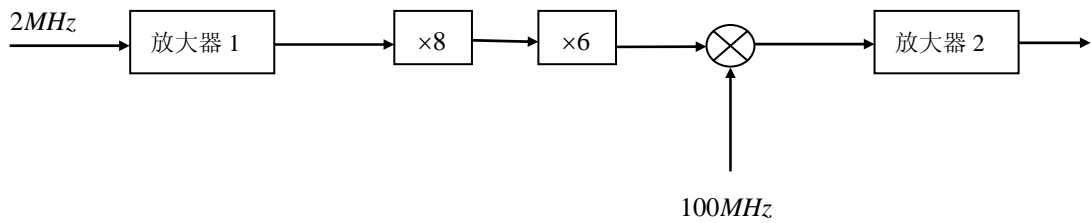


图 T3-11 发射机组成

3-12 已知角调制信号为 $s(t) = \cos(\omega_c t + 100 \cos \omega_m t)$:

- (1) 如果它是 PM 信号, 并且 $K_p = 2 \text{ rad/V}$, 试求调制信号;
- (2) 如果它是 FM 信号, 并且 $K_f = 2 \text{ rad/(s} \cdot \text{V)}$, 试求调制信号;
- (3) 以上两种已调信号的最大频偏为多少?

部分习题参考答案

3-4 解: 由图可知, 载频 $f_c = 10 \text{ KHz}$ 。AM 信号时域表示式为

$$s_{AM}(t) = [A_0 + A(\sin(100\pi t) + \sin(6000\pi t))] \times \cos(2\pi \times 10^4 t)$$

$$= A_0 \cos(20000\pi t) + 0.5A[\sin(20100\pi t) - \sin(19900\pi t) + \sin(26000\pi t) - \sin(14000\pi t)]$$

(公式 J3-4 (a))

AM 信号的四个边带频率分别为 13 KHz , 10.05 KHz , 9.95 KHz 和 7 KHz , 由图知

$$H(10 \text{ kHz}) = 0.5 \quad (\text{公式 J4-4 (b)})$$

$$H(13 \text{ kHz}) = 1 \quad (\text{公式 J4-4 (c)})$$

$$H(10.05 \text{ kHz}) = (10.05 - 9.5) \times 1 = 0.55 \quad (\text{公式 J3-4 (d)})$$

$$H(9.95 \text{ kHz}) = (9.95 - 9.5) \times 1 = 0.45 \quad (\text{公式 J3-4 (e)})$$

$$H(7 \text{ kHz}) = 0 \quad (\text{公式 J3-4 (f)})$$

所以 VSB 信号时域表达式为

$$s_{VSB}(t) = 0.5A_0 \cos(20000\pi t) + 0.5A[0.55 \sin(20100\pi t) - 0.45 \sin(19900\pi t) + \sin(26000\pi t)]$$

(公式 J3-4 (g))

3-5 解: 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

$$\sin \omega_1 t。根据 s_{SSB}(t) = \frac{1}{2} m(t) \cos \omega_c t \pm \frac{1}{2} \hat{m}(t) \sin \omega_c t 得$$

$$d(t) = \frac{1}{2} Am(t) \cos \omega_1 t + \frac{1}{2} A\hat{m}(t) \sin \omega_1 t \quad (\text{公式 J3-5 (a)})$$

根据式 $s_{SSB}(t) = \frac{1}{2} m(t) \sin \omega_c t \pm \frac{1}{2} \hat{m}(t) \cos \omega_c t$ 得

$$e(t) = \frac{1}{2} Am(t) \sin \omega_1 t - \frac{1}{2} A\hat{m}(t) \cos \omega_1 t \quad (\text{公式 J3-5 (b)})$$

$$s(t) = f(t) + g(t)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} Am(t)(\cos \omega_1 t + \sin \omega_1 t) \cos \omega_2 t + \frac{1}{2} A\hat{m}(t)(\sin \omega_1 t - \cos \omega_1 t) \sin \omega_2 t \\ &= \frac{1}{2} Am(t) \cos(\omega_2 - \omega_1)t - \frac{1}{2} A\hat{m}(t) \sin(\omega_2 - \omega_1)t \quad (\text{公式 J3-5 (c)}) \end{aligned}$$

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

3-7 解: (1) $S_i = S_c + S_m = (40 + 10)KW = 50KW$ (公式 J3-7 (a))

$$N_i = P_n(f) \cdot 2B = (0.5 \times 10^{-3} \times 2 \times 2 \times 5 \times 10^3)W = 10W \quad (\text{公式 J3-7 (b)})$$

$$\frac{S_i}{N_i} = 5000 \quad (\text{公式 J3-7 (c)})$$

(2) $s_{AM}(t) = [A + m(t)] \cos \omega_c t = A \cos \omega_c t + m(t) \cos \omega_c t$ (公式 J3-7 (d))

由已知边带功率值可得

$$\frac{1}{2} \overline{m^2(t)} = 10kW \quad (\text{公式 J3-7 (e)})$$

包络检波器输出信号和噪声分别为

$$m_0(t) = m(t) \quad (\text{公式 J3-7 (f)})$$

$$n_0(t) = n_c(t) \quad (\text{公式 J3-7 (g)})$$

所以, 包络检波器输出信号功率和噪声功率分别为

$$S_0 = \overline{m^2(t)} = 20kW \quad (\text{公式 J3-7 (h)})$$

$$N_0 = \overline{n_c^2(t)} = P_n(f) \cdot 2B = 10W \quad (\text{公式 J3-7 (i)})$$

检波器输出信噪功率比为

$$\frac{S_0}{N_0} = 2000 \quad (\text{公式 J3-7 (j)})$$

(3) 制度增益为

$$G = \frac{S_0 / N_0}{S_i / N_i} = \frac{2}{5} \quad (\text{公式 J3-7 (k)})$$

3-8 解: (1) 滤波器中心频率为 100KHz .

$$(2) N_i = 2P_n(f) \times 2f_H = (4 \times 0.5 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^3)W = 10W \quad (\text{公式 J3-8 (a)})$$

输入信噪功率比为 $S_i / N_i = 10 \times 10^3 / 10 = 10^3$ (公式 J3-8 (b))

(3) 输出信噪功率比为

$$S_o / N_o = G(S_i / N_i) = 2 \times 10^3 \quad (\text{公式 J3-8 (c)})$$

(4) 解调器输出噪声 $n_0(t)$ 为

$$(n_c(t) \cos \omega_c t - n_s(t) \sin \omega_c t) \cos \omega_c t \xrightarrow{LPF} \frac{1}{2} n_c(t) \quad (\text{公式 J3-8 (d)})$$

所以 $n_0(t)$ 的功率谱密度为

$$P_{n_0}(f) = \frac{1}{4} P_{n_c}(f) = \begin{cases} 0.25 \times 10^{-3} \text{ W/Hz}, & |f| \leq 5 \times 10^3 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (\text{公式 J3-8 (e)})$$

$P_{n_0}(f)$ 的图形如图 J4-8 所示.

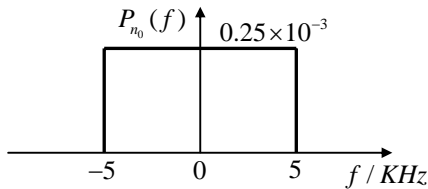


图 J4-8 输出噪声功率谱密度

3-9 解: (1) FM 信号带宽为

$$B_{FM} = 2(\Delta f + f_H) = 2(75 + 5)\text{KHz} = 160\text{KHz} \quad (\text{公式 J3-9 (a)})$$

接收机输入端理想带通滤波器的传输特性为

$$H(f) = \begin{cases} 1, & 99.92\text{MHz} \leq |f| \leq 100.08\text{MHz} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (\text{公式 J3-9 (b)})$$

(2) 解调器输入信号功率为

$$S_i = \frac{1}{2} A^2 = \frac{1}{2} \times 100^2 W = 5000W \quad (\text{公式 J3-9 (c)})$$

解调器输入噪声功率为

$$N_i = P_n(f) B_{FM} = 10^{-3} \times 160 \times 10^3 W = 160W \quad (\text{公式 J3-9 (d)})$$

解调器输入信号比为

$$S_i / N_i = 5000 / 160 = 31.25 \quad (\text{公式 J3-9 (e)})$$

(3) 解调器输出信号功率

$$S_o = \frac{K_F^2}{4\pi^2} \overline{m^2(t)} = \frac{(500\pi)^2}{4\pi^2} \times 5000W = 3125 \times 10^5 W \quad (\text{公式 J3-9 (f)})$$

解调器输出噪声功率为

$$N_o = \frac{2f_H^3 n_0}{3A^2} = \frac{2 \times (5 \times 10^3)^3 \times 10^{-3}}{3 \times 100^2} W = 83.3 \times 10^2 W \quad (\text{公式 J3-9 (g)})$$

解调器输出信噪比为

$$(S_o / N_o)_{FM} = 3125 \times 10^5 / (83.3 \times 10^2) = 37500 \quad (\text{公式 J3-9 (h)})$$

(4) AM 信号包络检波输出信噪比为

$$(S_o / N_o)_{AM} = \frac{\overline{m^2(t)}}{\overline{n_c^2(t)}} = \frac{5000}{2 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^3} = 500 \quad (\text{公式 J3-9 (i)})$$

$$\frac{(S_o / N_o)_{FM}}{(S_o / N_o)_{AM}} = 75, \quad \frac{B_{FM}}{B_{AM}} = \frac{160}{10} = 16 \quad (\text{公式 J3-9 (j)})$$

这说明, 频率调制系统抗噪性能的提高时以增加传输带宽(减低有效性)作为代价的。

3-10 解: (1) 输入信号功率

$$S_i = \frac{1}{2} \overline{m^2(t)} = \frac{1}{2} \int_{-f_m}^{f_m} P_m(f) df = \frac{1}{4} n_m f_m \quad (\text{公式 J3-10 (a)})$$

(2) 输出信号功率

$$S_o = \overline{m_0^2(t)} = \left[\frac{1}{2} \overline{m(t)} \right]^2 = \frac{1}{8} n_m f_m \quad (\text{公式 J3-10 (b)})$$

(3) 输出噪声功率

$$N_o = \overline{n_0^2(t)} = \left[\frac{1}{2} \overline{n_c(t)} \right]^2 = \frac{1}{4} \overline{n_c^2(t)} = \frac{1}{4} \bullet n_0 \bullet 2f_m = \frac{1}{2} n_0 f_m \quad (\text{公式 J3-10 (c)})$$

输出信噪比

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{n_m}{4n_0} \quad (\text{公式 J3-10 (d)})$$

3-11 解: 第 1 个放大器的输入信号的中心频率为 $2MHz$, 带宽为

$$B_1 = 2(\Delta f_1 + f_H) = [2 \times (300 + 10)] KHz = 620 KHz \quad (\text{公式 J3-11 (a)})$$

所以, 此放大器的中心频率为 $2MHz$, 通道宽度为 $620KHz$ 。

两次倍频后, 调频信号中心频率为 $96MHz$, 最大频偏为

$$\Delta f_2 = 300 \times 48 KHz = 144000 KHz = 14.4 MHz \quad (\text{公式 J3-11 (b)})$$

混频后, 调频信号中心频率为 $196MHz$, 最大频偏仍为 $14.4MHz$, 带宽为

$$B_2 = 2(\Delta f_2 + f_H) = 2 \times (14.4 + 0.01) MHz = 28.82 MHz \quad (\text{公式 J3-11 (c)})$$

所以, 第 2 个放大器的中心频率为 $196MHz$, 要求通带宽度为 $28.82MHz$ 。

3-12 解: (1) 调制信号为 $50 \cos \omega_m t$ 。

(2) 调制信号为 $50\omega_m \sin \omega_m t$ 。

(3) 最大频偏相同, $\Delta f_{PM} = \Delta f_{FM} = 100f_m$ 。