

## 模拟调制系统

线性调制

线性调制的抗噪声性能

非线性调制

宽带调频及其抗噪性能

调制系统的对比

第五章作业

# 模拟调制系统

- 调制可以分为线性调制（幅度调制）和非线性调制（角度调制）
  - 幅度调制：调幅（AM）、双边带（DSB）、单边带（SSB）、残留边带（VSB）
  - 角度调制：相位调制（PM）、频率调制（FM）

注：其中频率调制还可以分为：窄带调频（NBFM）、宽带调频（WBFM）

其中重点掌握：AM、DSB、SSB、WBFM
- 调制的作用
  - 将基带信号搬运较高频率提高发射效率
  - 实现信道的多路复用
  - 扩展信号带宽、提高抗干扰、抗衰落能力
- 解调的方法：
  - 相干解调（适用线性调制信号、NBFM）
  - 包络检波（AM）
  - 非相干解调（适用于NBFM、WBFM）

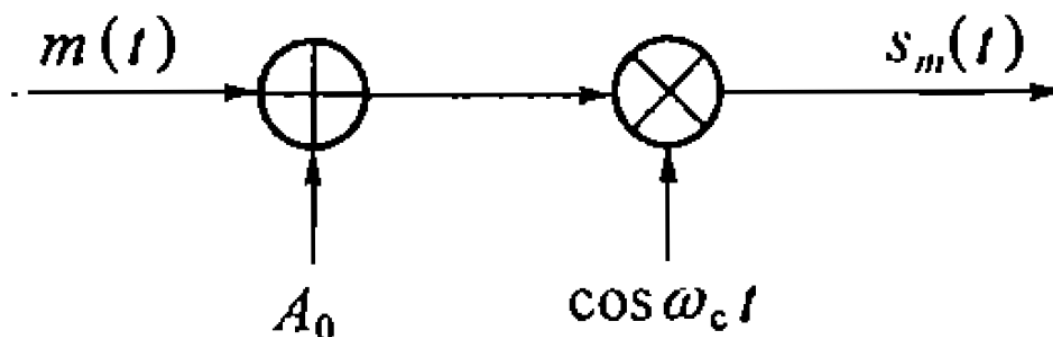
## 线性调制

- 幅度调制信号表达式：

$$s_m(t) = A_m(t) \cos \omega_c t \quad (1)$$

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

- AM信号



$$s_{AM}(t) = [A_0 + m(t)]\cos w_c t \quad (2)$$

$$S_{AM}(w) = \pi A_0 [\delta(w + w_c) + \delta(w - w_c)] + \frac{1}{2} [M(w + w_c) + M(w - w_c)]$$

- DSB信号一般形式

$$s_{DSB}(t) = m(t)\cos w_c t \quad (3)$$

$$S_{DSB}(w) = \frac{1}{2} [M(w + w_c) + M(w - w_c)]$$

- DSB信号（单频调制信号）

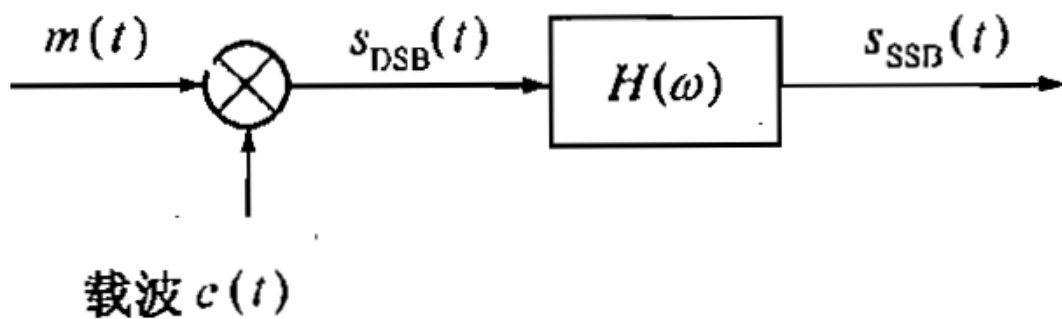
$$s_{DSB}(t) = A_m \cos w_m t \cos w_c t \quad (4)$$

$$= \frac{1}{2} A_m \cos(w_c + w_m)t + \frac{1}{2} A_m \cos(w_c - w_m)t$$

= 上边带信号 + 下边带信号

$$S_{DSB}(w) = \frac{\pi \cdot A_m}{2} [\delta(w + w_c + w_m) + \delta(w - w_c - w_m) + \delta(w + w_c - w_m) + \delta(w - w_c + w_m)]$$

- SSB信号时域表达式



$$s_{SSB}(t) = \frac{1}{2} m(t) \cos w_c t + \frac{1}{2} \hat{m}(t) \sin w_c t \quad (5)$$

- $\hat{m}(t)$  称为希尔伯特变换, 相移  $\pi/2$

$$A_m \cos w_m t = A_m \sin w_m t \quad (6)$$

- 带宽

$$\begin{cases} AM: & B_{AM} = 2f_H \\ SSB: & B_{SSB} = f_H \end{cases}$$

- 输入信号功率

$$P = s_m^2(t)$$

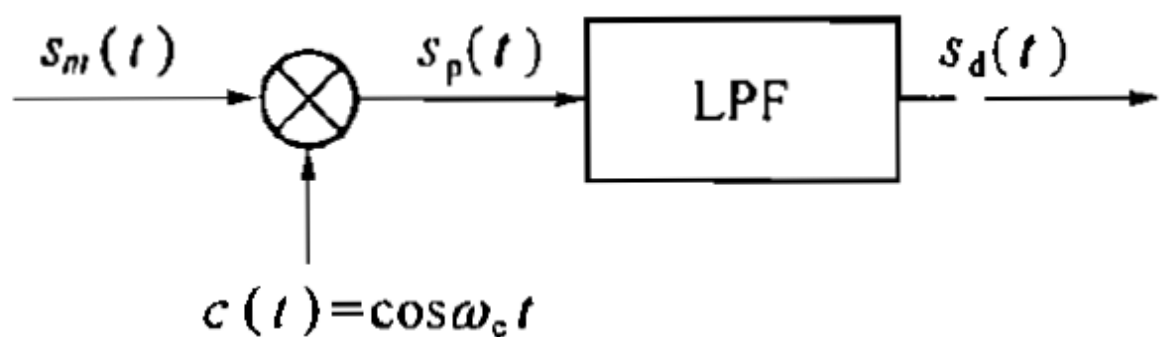
$$P_{AM} = \frac{A_0^2}{2} + \frac{m^2(t)}{2} = P_c + P_s$$

$$\eta_{AM} = \frac{P_s}{P_{AM}}$$

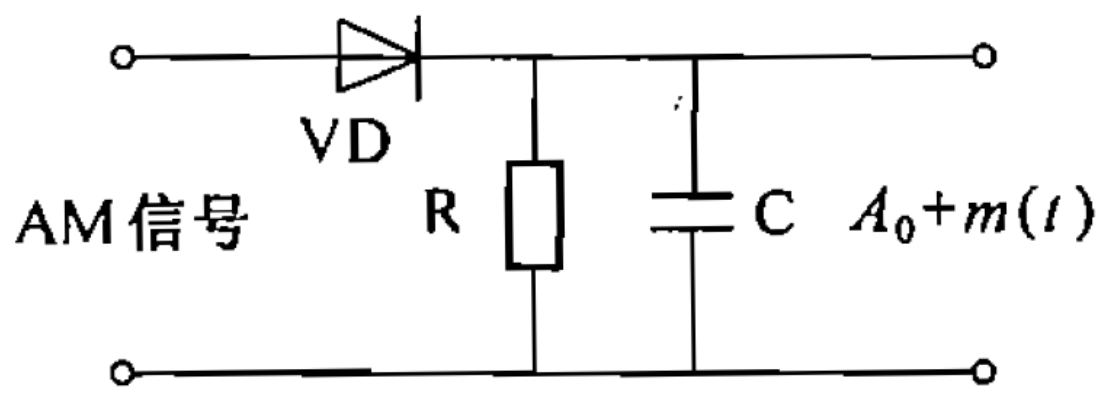
当 AM 调制效率最大时  $m^2(t) = A_m^2/2, \eta_{max} = \frac{1}{3}$

# 线性调制的抗噪声性能

- 相干解调适用于所有的线性调制信号



- 包络检波适用于AM信号



- 常见参数：输入噪声、输出噪声、输出信噪比、调制制度增益、高斯白噪声

$$\frac{S_0}{N_0} = \frac{\text{解调器输出有用信号的平均功率}}{\text{解调器输出噪声的平均功率}} \quad (7)$$

$$G = \frac{S_0/N_0}{S_i/N_i}$$

$$n_i(t) = n_c(t)\cos\omega_c t - n_s(t)\sin\omega_c t$$

- 相干解调DSB

$$S_0 = \frac{1}{2} S_i = \frac{1}{4} m^2(t) \quad (8)$$

$$N_0 = \frac{1}{4} N_i = \frac{1}{4} n_0 B_{DSB}$$

$$G_{DSB} = 2$$

- 相干解调SSB

$$S_0 = \frac{1}{4} S_i = \frac{1}{4} [\frac{1}{4} m^2(t)] \quad (9)$$

$$N_0 = \frac{1}{4} N_i = \frac{1}{4} n_0 B_{SSB}$$

$$G_{SSB} = 1$$

- 包络检波AM（大信噪比条件）

$$G_{AM} = \frac{2\overline{m^2}(t)}{A_0^2 + \overline{m^2}(t)} \rightarrow G_{max} = \frac{2}{3} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} S_o &= \overline{m^2}(t) & N_o &= N_i \\ E(t) &= A_0 + m(t) + n_c(t) \end{aligned}$$

- 小信噪比条件下输出信噪比随输入信噪比下降急剧恶化，称为门限效应

## 非线性调制

- 角度调制

$$s_m(t) = A \cos[w_c t + \varphi(t)] \quad (11)$$

- $\varphi > \frac{\pi}{6}$  采用宽带调频
- $\varphi < \frac{\pi}{6}$  采用窄带调频
- FM、PM的表达式

$$s_{PM}(t) = A \cos[w_c t + K_p m(t)] \quad (12)$$

$$s_{FM}(t) = A \cos[w_c t + K_f \int m(\tau) d\tau]$$

$$m(t) = A_m \cos w_m t = A_m \cos 2\pi f_m t$$

- 调频指数（最大相偏）

$$m_f = \frac{K_f A_m}{w_m} = \frac{\Delta f}{f_m} \quad (13)$$

## 宽带调频及其抗噪性能

- FM信号的频域表达式

$$S_{AM}(\omega) = \pi A [\delta(\omega + \omega_c) + \delta(\omega - \omega_c)] + \frac{1}{2} [M(\omega + \omega_c) + M(\omega - \omega_c)] \quad (14)$$

- 调频波的有效带宽（卡森公式）

$$B_{FM} = 2(m_f + 1) = 2(\Delta f + f_m) \quad (15)$$

- FM功率

$$P_{FM} = \frac{A^2}{2} = P_c \quad (16)$$

- 非相干解调：产生一个与输入调频信号的频率呈线性关系的输出电压：频率检波器（鉴频器）
  - 鉴频器的本质：微分电路+包络检波器

- 输入信号功率，输入噪声功率

$$\begin{aligned} S_i &= \frac{A^2}{2} \\ N_i &= n_0 B_{FM} \end{aligned} \quad (17)$$

- 输出信噪比

$$\frac{S_0}{N_0} = \frac{3}{2} m_f^2 \frac{A^2/2}{n_0 f_m} \quad (18)$$

- 单音频增益功率

$$G_{FM} = 3m_f^2(m_f + 1) \tag{19}$$

### 调制系统的对比

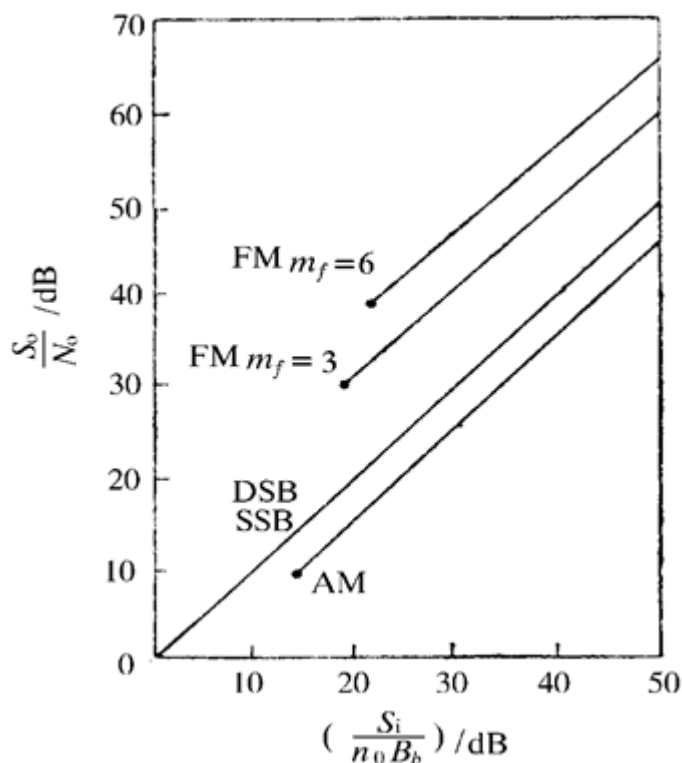


## 第5章 模拟调制系统

### • 5.5 各种模拟调制系统的比较

调制方式	传输带宽	$S_o / N_o$	设备复杂程度	主要应用
AM	$2f_m$	$\left(\frac{S_o}{N_o}\right)_{AM} = \frac{1}{3} \left(\frac{S_i}{n_o f_m}\right)$	简单	中短波无线电广播
DSB	$2f_m$	$\left(\frac{S_o}{N_o}\right)_{DSB} = \left(\frac{S_i}{n_o f_m}\right)$	中等	应用较少
SSB	$f_m$	$\left(\frac{S_o}{N_o}\right)_{SSB} = \left(\frac{S_i}{n_o f_m}\right)$	复杂	短波无线电广播、话音频分复用、载波通信、数据传输
VSB	略大于 $f_m$	近似SSB	复杂	电视广播、数据传输
FM	$2(m_f + 1)f_m$	$\left(\frac{S_o}{N_o}\right)_{FM} = \frac{3}{2} m_f^2 \left(\frac{S_i}{n_o f_m}\right)$	中等	超短波小功率电台（窄带FM）；调频立体声广播等高质量通信（宽带FM）

- 抗噪声性能
-



$$WBFM > DSB > SSB > VSB > AM \quad (20)$$

- 频带利用率
  - SSB带宽最窄、频带利用率最高
  - FM频带利用率最低，带宽可随 $m_f$ 调
  - AM\FM 包络存在门限现象
- 特点与应用
  - AM：优点是接收设备简单；缺点是功率利用率低，抗干扰能力差。主要用在中波和短波调幅广播。
  - DSB调制：优点是功率利用率高，且带宽与AM相同，但设备较复杂。应用较少，一般用于点对点专用通信。
  - SSB调制：优点是功率利用率和频带利用率都较高，抗干扰能力和抗选择性衰落能力均优于AM，而带宽只有AM的一半；缺点是发送和接收设备都复杂。SSB常用于频分多路复用系统中。
  - VSB调制：抗噪声性能和频带利用率与SSB相当。在电视广播、数传等系统中得到了广泛应用。
  - FM：FM的抗干扰能力强，广泛应用于长距离高质量的通信系统中。缺点是频带利用率低，存在门限效应。

## 第五章作业

注意上图是幅度谱，相位谱没有画出。

**题 5-2** 根据题图 5-2 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。

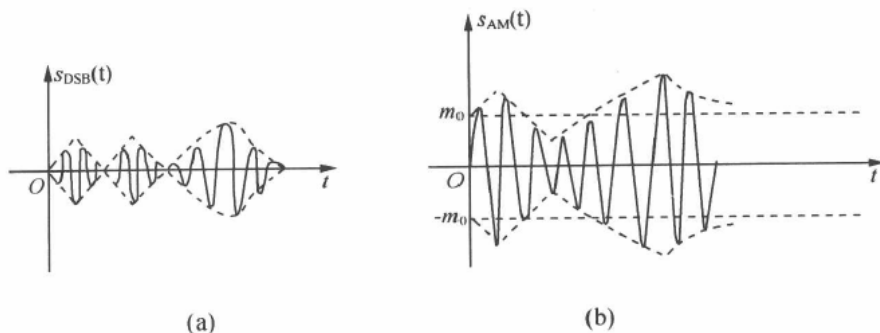
**【解题思路】** 略。

**【解】** 信号经双边带调制和振幅调制后的波形分别为  $s_{DSB}(t)$  和



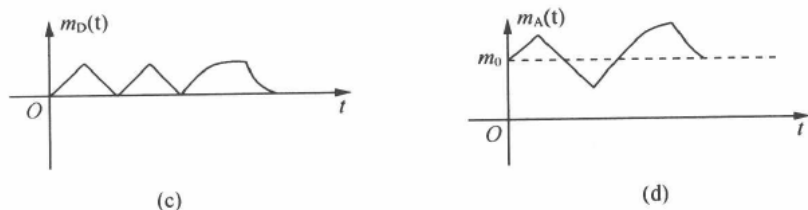
题图 5-2

$s_{AM}(t)$ , 图形分别见图解 5-2(a)、(b)。



图解 5-2(a)、(b)

经包络检波后, 两者的波形分别见图解 5-2(c)、(d)所示。



图解 5-2(c)、(d)

由图可看出, 与题图中  $m(t)$  相比,  $m_D(t)$  有严重失真, 而  $m_A(t)$  无失真。因此, 双边带信号不能用包络检波法解调。

**题 5-3** 已知调制信号  $m(t) = \cos(2\,000\pi t) + \cos(4\,000\pi t)$ , 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。

**【解题思路】** 当载波为  $\cos(\omega_c t)$  时, SSB 信号的时域表达式为

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

其中  $\hat{m}(t)$  是  $m(t)$  相移  $90^\circ$  的正交函数, “-”号对应上边带, “+”号对应下边带。

**【解】** 由题可知

$$m(t) = \cos(2\,000\pi t) + \cos(4\,000\pi t)$$

则有

$$\hat{m}(t) = \sin(2\,000\pi t) + \sin(4\,000\pi t)$$

进而得上边带信号表示式为:

$$\begin{aligned} s_{USB}(t) &= [\cos(2\,000\pi t) + \cos(4\,000\pi t)] \cos(10\,000\pi t) \\ &\quad - \frac{1}{2} [\sin(2\,000\pi t) + \sin(4\,000\pi t)] \sin(10\,000\pi t) \\ &= \frac{1}{4} [\cos(12\,000\pi t) + \cos(8\,000\pi t) + \cos(14\,000\pi t) + \cos(6\,000\pi t)] \\ &\quad + \frac{1}{4} [\cos(12\,000\pi t) - \cos(8\,000\pi t) + \cos(14\,000\pi t) - \cos(6\,000\pi t)] \\ &= \frac{1}{2} [\cos(12\,000\pi t) + \cos(14\,000\pi t)] \end{aligned}$$

其频域表示式为:

$$S_{USB}(\omega) = \frac{\pi}{2} [\delta(\omega + 12\,000\pi) + \delta(\omega - 12\,000\pi) + \delta(\omega + 14\,000\pi) + \delta(\omega - 14\,000\pi)]$$

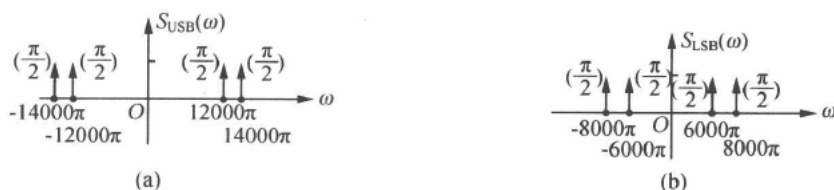
同理可得下边带信号表示式为

$$\begin{aligned} s_{LSB} &= \frac{1}{2} [\cos(2\,000\pi t) + \cos(4\,000\pi t)] \cos(10\,000\pi t) \\ &\quad + \frac{1}{2} [\sin(2\,000\pi t) + \sin(4\,000\pi t)] \sin(10\,000\pi t) \\ &= \frac{1}{2} [\cos(8\,000\pi t) + \cos(6\,000\pi t)] \end{aligned}$$

其频域表示式为

$$S_{LSB}(\omega) = \frac{\pi}{2} [\delta(\omega + 8\,000\pi) + \delta(\omega - 8\,000\pi) + \delta(\omega + 6\,000\pi) + \delta(\omega - 6\,000\pi)]$$

上、下边带信号的频谱图分别见图解 5-3(a)、(b)所示:



图解 5-3

**题 5-7** 设某信道具有均匀的双边噪声功率谱密度  $P_n(f) = 0.5 \times 10^{-3}$  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 5 kHz,而载波为 100 kHz,已调信号的功率为 10 kW。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) 该理想带通滤波器中心频率和通带宽度为多大?
- (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。

**【解题思路】** 对于双边带调制系统,有  $B = 2f_H$ 。增益  $G = 2$  及  $N_0 = \frac{1}{4} N_i$  等特性。

**【解】** (1) 该理想 BPF 的中心频率为 100 kHz,  $B = 2 \times 5$  kHz = 10 kHz

(2) 解调器输入端的信噪功率比为

$$\frac{S_i}{N_i} = \frac{10K}{2P_n(f) \times B} = \frac{10 \times 10^3}{2 \times 0.5 \times 10^{-3} \times 2 \times 5 \times 10^3} = 1\,000$$

(3) 解调器输出端的信噪功率比为

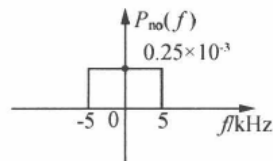
$$\frac{S_o}{N_o} = G \times \frac{S_i}{N_i} = 2 \times 1\,000 = 2\,000$$

(4) 由于  $N_0 = \frac{1}{4} N_i = \frac{1}{4} \times 2P_n(f)B = \frac{1}{2} P_n(f)B$

故输出端噪声功率谱密度

$$P_{n_o}(f) = \frac{1}{2} P_n(f) = 0.25 \times 10^{-3} \text{ W/Hz} \quad (|f| \leq 5 \text{ kHz})$$

其图形见图解 5-7:



图解 5-7



**题 5-8** 若对某一信号用 DSB 进行传输, 设加至接收机的调制信号  $m(t)$  之功率谱密度为

$$P_m(f) = \begin{cases} \frac{n_m}{2} \cdot \frac{|f|}{f_m} & |f| \leq f_m \\ 0 & |f| > f_m \end{cases}$$

试求:

- (1) 接收机的输入信号功率;
- (2) 接收机的输出信号功率;
- (3) 若叠加于 DSB 信号的白噪声具有双边功率谱密度为  $n_0/2$ , 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, 输出信噪功率比是多少?

**【解题思路】** 对于双边带调制系统

$$\text{输入信号功率 } S_i = \frac{1}{2} \overline{m^2(t)}$$

$$\text{输出信号功率 } S_0 = \overline{m^2(t)} = \left[ \frac{1}{2} \overline{m(t)} \right]^2 = \frac{1}{4} \overline{m^2(t)}$$

$$\text{输出噪声功率 } N_0 = \frac{1}{4} \overline{n_c^2(t)}$$

$$\text{【解】 (1) } S_i = \frac{1}{2} \overline{m^2(t)} = \frac{1}{2} \int_{-f_m}^{f_m} \frac{n_m}{2} \cdot \frac{|f|}{f_m} df = \frac{n_m}{2f_m} \int_0^{f_m} f df = \frac{1}{4} n_m f_m$$

$$(2) S_0 = \overline{m_0^2(t)} = \frac{1}{4} \overline{m^2(t)} = \frac{1}{8} n_m f_m$$

$$(3) \text{ 由于 } N_0 = \overline{n_0^2(t)} = \left[ \frac{1}{2} \overline{n_c(t)} \right]^2 = \frac{1}{4} \overline{n_c^2(t)} = \frac{1}{4} n_0 B = \frac{1}{4} n_0 \times 2f_m = \frac{1}{2} n_0 f_m$$

故输出信噪功率比为

$$\frac{S_0}{N_0} = \frac{\frac{1}{8} n_m f_m}{\frac{1}{2} n_0 f_m} = \frac{n_m}{4n_0}$$

**题 5-9** 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 5 kHz, 而载波是 100 kHz, 已调信号功率是 10 kW。若接收机的输入信号在加至解调器前, 先经过带宽为 5 kHz 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?

**【解题思路】** 对于单边带调制系统, 其系统增益  $G=1$ , 带宽  $B=f_H$ 。

**【解】** (1) 理想带通滤波器中心频率为 102.5 kHz。

(2) 解调器输入端的信噪功率比为

$$\frac{S_i}{N_i} = \frac{10k}{2P_n(f) \times B} = \frac{10 \times 10^3}{2 \times 0.5 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^3} = 2000$$

(3) 解调器输出端的信噪功率比为

$$\frac{S_0}{N_0} = G \cdot \frac{S_i}{N_i} = 1 \times 2000 = 2000$$

**题 5-10** 某线性调制系统的输出信噪比为 20 dB, 输出噪声功率为  $10^{-9}$  W, 由发射机输出端到解调器输入端之间总的传输损耗为 100 dB。试求:

(1) DSB/SC 时的发射机输出功率;

(2) SSB/SC 时的发射机输出功率。

**【解题思路】**  $\frac{S_0}{N_0} = G \cdot \frac{S_i}{N_i}$ , 且对于双边带、单边带调制系统, 其输出噪声功率与输入噪声功率均满足  $N_0 = \frac{1}{4} N_i$ 。

**【解】** 由题可知:  $\frac{S_0}{N_0} = 20$  dB 即  $\frac{S_0}{N_0} = 100$ , 且  $N_0 = 10^{-9}$  W。则有

$$N_i = 4N_0 = 4 \times 10^{-9} \text{ W}$$

(1) 对于 DSB 调制系统, 系统增益  $G=2$ 。则有

$$\frac{S_i}{N_i} = \frac{1}{G} \cdot \frac{S_0}{N_0} = \frac{1}{2} \times 100 = 50$$

进而可得

$$S_i = 50N_i = 50 \times 4 \times 10^{-9} = 2 \times 10^{-7} \text{ W}$$

由于传输损耗为 100 dB, 设发射机输出功率为  $S_1$ , 则有  $10\lg \frac{S_1}{S_i} = 100$ , 可得  $\frac{S_1}{S_i} = 10^{10}$ , 进而有

$$S_1 = S_i \times 10^{10} = 2 \times 10^{-7} \times 10^{10} = 2\,000 \text{ W}$$

(2) 同理, 对于 SSB 调制系统,  $G=1$ , 所以有

$$S_i = 100N_i = 4 \times 10^{-7} \text{ W}$$

设发射机输出功率为  $S_2$ , 则有  $10\lg \frac{S_2}{S_i} = 100$  即

$$S_2 = 4 \times 10^{-7} \times 10^{10} = 4\,000 \text{ W}$$

**题 5-13** 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  $5 \text{ kHz}$ , 载频是  $100 \text{ kHz}$ , 边带功率为  $10 \text{ kW}$ , 载波功率为  $40 \text{ kW}$ 。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  $G$ 。

**【解题思路】** 对于调幅(AM)系统

$$\text{其解调器输入的信号功率 } S_i = \frac{A^2}{2} + \frac{\overline{m^2(t)}}{2}$$

$$\text{输入的噪声功率 } N_i = n_0 B = 2n_0 f_H$$

$$\text{输出的信号功率 } S_0 = \overline{m^2(t)}$$

$$\text{输出的噪声功率 } N_0 = n_0 B = 2n_0 f_H$$

**【解】** (1) 由于

$$S_i = \frac{A^2}{2} + \frac{\overline{m^2(t)}}{2} = 40 \text{ kW} + 10 \text{ kW} = 50 \text{ kW}$$

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

所以输入端信噪功率比为

$$\frac{S_i}{N_i} = \frac{50 \text{ K}}{10} = 5000$$

(2) 由于在大信噪比下,

$$S_0 = \overline{m^2(t)} = 20 \text{ kW} \quad N_0 = N_i = 10 \text{ W}$$

所以输出端信噪功率比为

$$\frac{S_0}{N_0} = \frac{20 \text{ K}}{10} = 2000$$

(3) 系统制度增益

$$G = \frac{\frac{S_0}{N_0}}{\frac{S_i}{N_i}} = \frac{2000}{5000} = \frac{2}{5}$$

**题 5-16** 设一宽带 FM 系统,载波振幅为 100 V,频率为 100 MHz,调制信号  $m(t)$  的频带限制于 5 kHz,  $\overline{m^2(t)} = 5\,000\text{ V}^2$ ,  $k_f = 500\pi\text{ rad}/(\text{s} \cdot \text{V})$ ,最大频偏  $\Delta f = 75\text{ kHz}$ ,并设信道中噪声功率谱密度是均匀的,其  $P_n(f) = 10^{-3}\text{ W/Hz}$ (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 AM 调制方法传输,并以包络检波器进行解调,试比较在输出信噪比和所需带宽方面与 FM 系统有何不同?

**【解题思路】** 对于频率调制系统

其带宽  $B_{\text{FM}} = 2(\Delta f + f_H)$

解调器输入端信号功率  $S_i = \frac{A^2}{2}$ , 噪声功率  $N_i = n_0 B$

解调器输出端信号功率  $S_0 = \overline{m_0^2(t)} = \frac{K_f^2}{4\pi^2} \cdot \overline{m^2(t)}$ , 噪声功率  $N_0 = \frac{2n_0}{3A^2} f_m^3$

**【解】** (1) 由于  $B_{\text{FM}} = 2(\Delta f + f_H) = 2 \times (75 + 5) = 160\text{ kHz} = 0.16\text{ MHz}$ , 且载频为 100 MHz。故可知接收机输入端理想带通滤波器的传输特性  $H(\omega)$  为:

$$H(\omega) = \begin{cases} K, & 1.9984\pi \times 10^8 \text{ rad/s} \leq |\omega| \leq 2.0016\pi \times 10^8 \text{ rad/s} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (K \text{ 为常数})$$

(2) 由于

$$S_i = \frac{A^2}{2} = \frac{1}{2} \times 100^2 = 5\,000\text{ W}$$

$$N_i = n_0 B = P_n(f) \times B_{\text{FM}} = 10^{-3} \times 160 \times 10^3 = 160\text{ W}$$

故可得输入端信噪功率比为

$$\frac{S_i}{N_i} = \frac{5\,000}{160} = 31.25$$

(3) 由于

$$S_0 = \frac{K_f^2}{4\pi^2} \cdot \overline{m^2(t)} = \frac{(500\pi)^2}{4\pi^2} \times 5\,000 = 3.125 \times 10^8\text{ W}$$

$$N_0 = \frac{2n_0}{3A^2} f_m^3 = \frac{2 \times 10^{-3} \times (5\,000)^3}{3 \times 100^3} \approx 8\,333.3\text{ W}$$

故可得输出端信噪功率比为

$$\frac{S_0}{N_0} = \frac{3.125 \times 10^8}{8\,333.3} \approx 37\,500$$

(4) 若  $m(t)$  以幅度调制方式传输,则其带宽  $B_{\text{AM}} = 2f_m = 2 \times 5\text{ k} = 10\text{ kHz}$  且包络检测后输出信噪功率比为

$$\left( \frac{S_0}{N_0} \right)_{\text{AM}} = \frac{\overline{m^2(t)}}{\overline{n_c^2(t)}} = \frac{5\,000}{10^{-3} \times 10\text{ k}} = 500$$

从而可知两者输出信噪功率比为

$$\frac{\left( \frac{S_0}{N_0} \right)_{\text{FM}}}{\left( \frac{S_0}{N_0} \right)_{\text{AM}}} = \frac{37\,500}{500} = 75$$

带宽比为

$$\frac{B_{\text{FM}}}{B_{\text{AM}}} = \frac{160}{10} = 16$$

可见虽然频率调制系统的抗噪性能提高了,但它占用了更多传输带宽,其有效性降低了。

**题 5-17** 已知某单频调频波的振幅是 10 V,瞬时频率为

$$f(t) = 10^6 + 10^4 \cos 2\pi \times 10^3 t (\text{Hz})$$

试求:

- (1) 此调频波的表达式;
- (2) 此调频波的频率偏移、调频指数和频带宽度;
- (3) 若调制信号频率提高到  $2 \times 10^3$  Hz,则调频波的频偏、调频指数和频带宽度如何变化?

**【解题思路】** 根据角度调制信号的一般表达式及调频信号表达式可分析得知。

**【解】** (1) 此调频波的表达式为:

$$\begin{aligned} S_{\text{FM}}(t) &= A \cos [\omega_c(t) + \varphi(t)] = A \cos \int_{-\infty}^t 2\pi f(\tau) d\tau \\ &= 10 \cos \int_{-\infty}^t 2\pi \cdot (10^6 + 10^4 \cos 2\pi \times 10^3 \tau) d\tau \\ &= 10 \cos (2\pi \times 10^6 t + 10 \sin 2\pi \times 10^3 t) (\text{V}) \end{aligned}$$

(2) 由已知  $\Delta f(t) = 10^4 \cos 2\pi \times 10^3 t (\text{Hz})$

$\therefore$  最大频偏  $\Delta f = \Delta f(t)_{\max} = 10^4 (\text{Hz})$

$$\text{调频指数 } m_f = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{10^4}{10^3} = 10$$

$$\text{频带宽度 } B_{\text{FM}} = 2(m_f + 1)f_m = 2(10 + 1) \times 10^3 = 22 \text{ kHz}$$

(3) 由调频信号的表达式可知,调频波的频率偏移与调频信号的频率无关,所以若调制信号频率提高,调频波的频偏仍然为  $\Delta f = 10^4 \text{ Hz} = 10 \text{ kHz}$

$$\text{调频指数: } m_f = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{10^4}{2 \times 10^3} = 5$$

$$\text{频带宽度: } B_{\text{FM}} = 2(m_f + 1)f_m = 2(5 + 1) \times 2 \times 10^3 = 24 \text{ kHz}$$

**题 5-19** 有 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 0~4 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。

**【解题思路】** 根据频分复用定义即信道带宽被分成多个相互不重叠的频段(子通道)求解,FM 调制,带宽定义为  $B = 2(m_f + 1)f_m$ 。

**【解】** (1) 合成信号带宽:  $B = 60 \times (4 - 0) = 240 \text{ kHz}$

(2) 信道传输信号带宽:

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