



第五章

模拟调制系统简介



主要内容

- 调制基本概念
- 幅度调制基本原理
- 频分复用



5.1 调制基本概念

■ 调制

- 用调制信号（基带信号）去控制载波的参数，使载波参数按照调制信号的规律变化

■ 调制目的

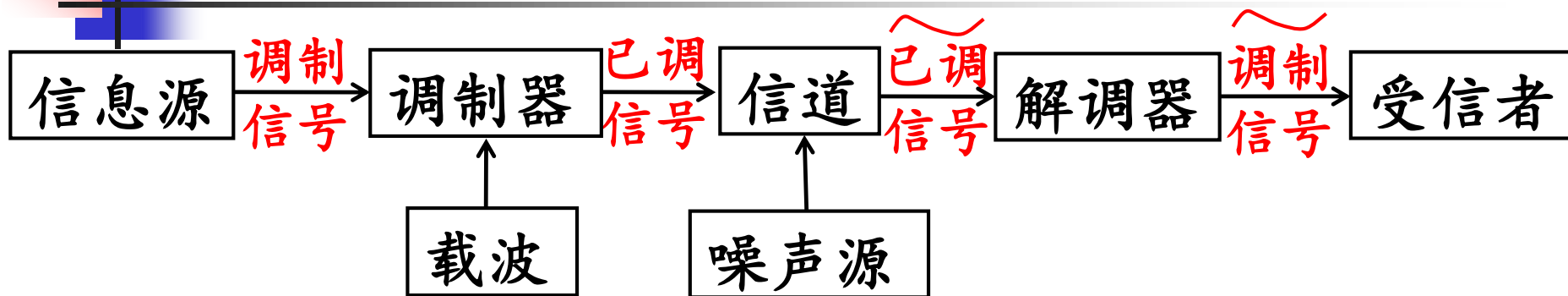
- 解决基带信号在信道中传输
- 解决多路复用传输，提高信道利用率
- 提高抗噪声能力，提高信号传输质量

$A \cos(\omega_c t + \varphi)$

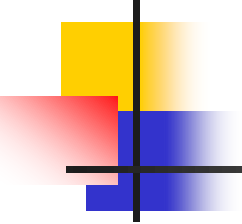
调制分类

| | | | | | |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|------------|----------|
| 载波调制方式 | 正弦调制 | 模拟调制 | 幅度调制 (线性调制) | 标准调幅 AM | |
| | | | | 双边带调制 DSB | |
| | | | | 单边带调制 SSB | |
| | | | | 残留边带调制 VSB | |
| | | 角度调制 (非线性调制) | 调频 FM | | |
| | | | 调相 PM | | |
| | | | 数字调制 | | 振幅键控 ASK |
| | | | | | 频移键控 FSK |
| | 相移键控 PSK, DPSK | | | | |
| | 其他 QAM, MSK | | | | |
| | 脉冲调制 | 脉冲模拟调制 | | 脉幅调制 PAM | |
| | | | | 脉宽调制 PDM | |
| | | | | 脉位调制 PPM | |
| | | 脉冲数字调制 | | 脉码调制 PCM | |
| 增量调制 ΔM | | | | | |
| 差分脉码调制 DPCM | | | | | |

■ 模拟调制系统模型



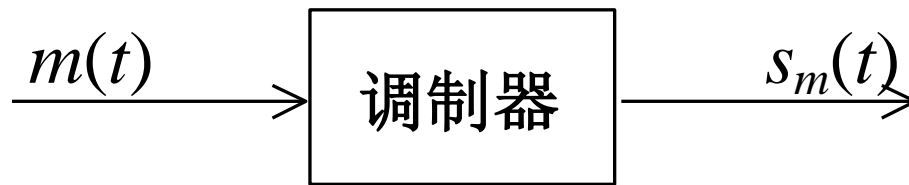
- **调制信号**——来自信源的原始模拟电信号（基带信号）
- **载波**——周期性高频振荡信号，适合在信道中传送，模拟调制载波为正弦信号
- **已调信号**——载波经调制后的信号，含有调制信号的全部特征



■ 正弦载波： $s(t) = A \cos(\omega_c t + \varphi_0)$

A — 振幅
 ω_c — 角频率
 φ_0 — 初始相位

} 载波的两个参量恒定

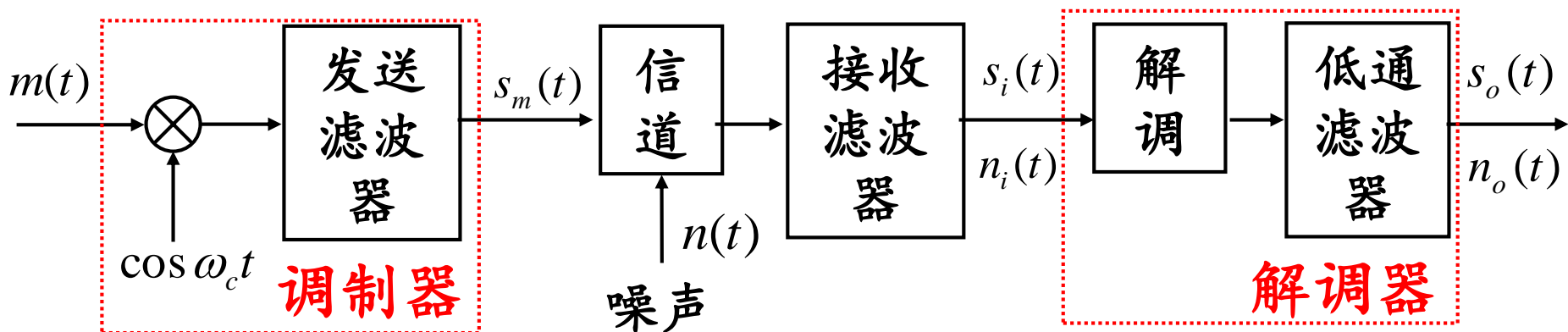


$$S_m(t) = A(t) \cos(\omega_c t + \varphi_0)$$

调幅灵敏度 $\longrightarrow = K_m m(t) \cos(\omega_c t + \varphi_0)$

5.2 幅度调制原理

■ 幅度调制系统原理图



- 假设信道特性理想
- $n(t)$: 高斯白噪声
- $n_i(t)$: 窄带噪声
- $n_o(t)$: 低通噪声



一. 幅度调制（线性调制）原理

- **幅度调制：** 正弦载波的幅度随调制信号的规律变化，频谱实现线性搬移的过程

基带信号： $m(t)$

正弦载波： $s(t) = A \cos(\omega_c t + \varphi_0)$

设： $A = 1$, $\varphi_0 = 0$, $\overline{m(t)} = 0$

已调信号： $s_m(t) = m(t) \cos \omega_c t$

$$S_m(\omega) = \frac{1}{2} [M(\omega - \omega_c) + M(\omega + \omega_c)]$$



■ 证明

$$\because m(t) \Leftrightarrow M(\omega)$$

$$s_m(t) = m(t)\cos\omega_c t = m(t) \cdot \frac{1}{2}(e^{j\omega_c t} + e^{-j\omega_c t})$$

$$\therefore S_m(\omega) = \frac{1}{2}[M(\omega - \omega_c) + M(\omega + \omega_c)]$$

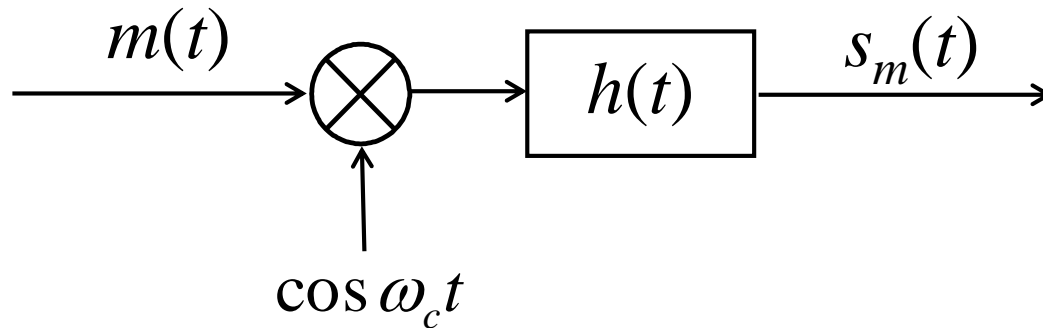
■ 或

$$\cos\omega_c t \Leftrightarrow \pi[\delta(\omega + \omega_c) + \delta(\omega - \omega_c)]$$

$$m(t)\cos\omega_c t \Leftrightarrow \frac{1}{2\pi}M(\omega) * \pi[\delta(\omega + \omega_c) + \delta(\omega - \omega_c)]$$

$$\therefore S_m(\omega) = \frac{1}{2}[M(\omega + \omega_c) + M(\omega - \omega_c)]$$

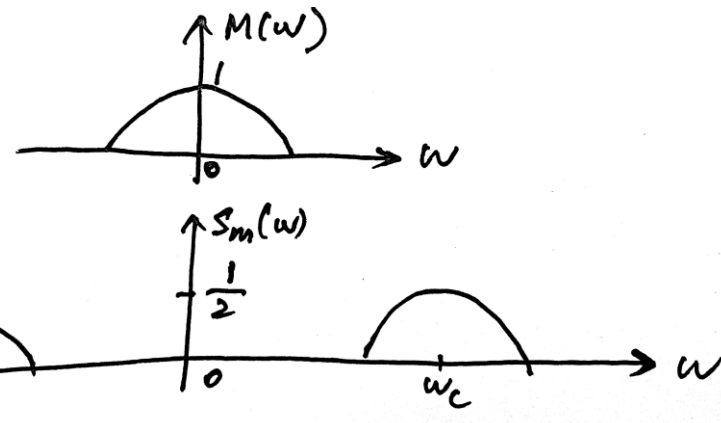
■ 幅度调制器一般模型

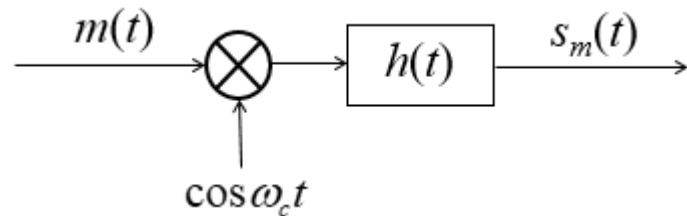


- 乘法器用于基本调制，发送滤波器 $h(t)$ 控制产生不同的调幅波（AM、DSB、SSB、VSB）

$$s_m(t) = [m(t) \cos \omega_c t] * h(t)$$

$$S_m(\omega) = \frac{1}{2} [M(\omega - \omega_c) + M(\omega + \omega_c)] \cdot H(\omega)$$





1. 双边带调制DSB

■ DSB-SC——双边带抑制载波调制信号

$$s_{DSB}(t) = m(t) \cos \omega_c t$$

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

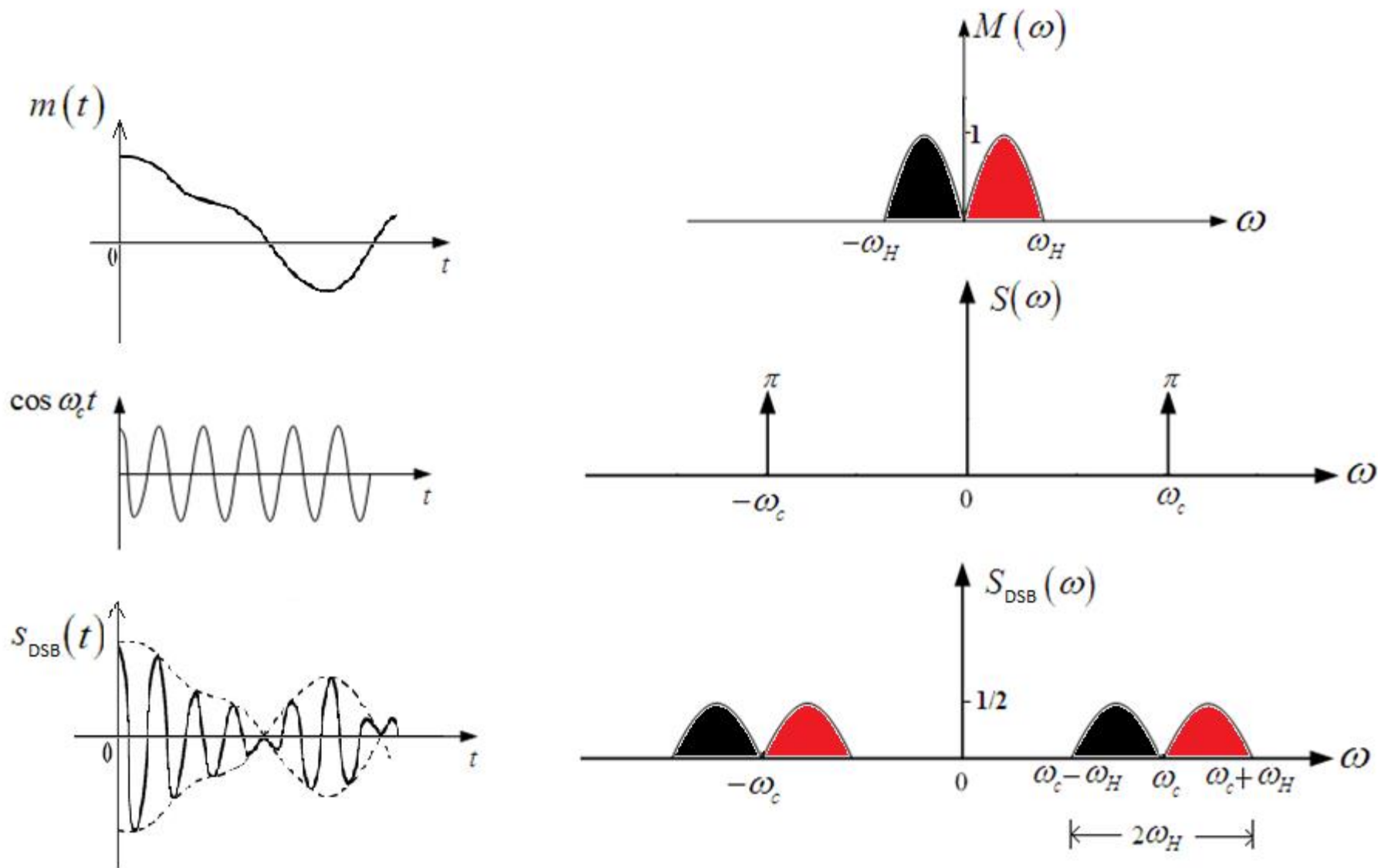
■ 设 $h(t)$ 为理想带通滤波器

$$|H_{BPF}(f)| = 1, \quad B_{BPF} = 2f_H, \quad \mathbf{B_{DSB} = 2f_H}$$

■ 特点

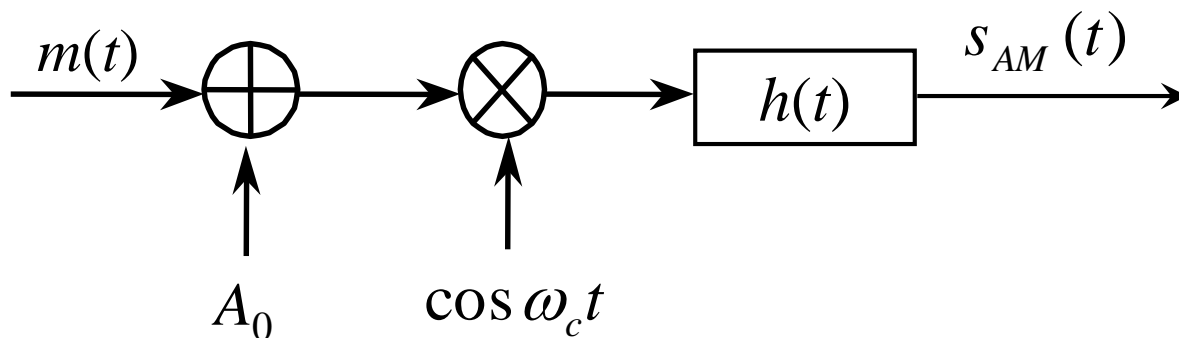
- 频带浪费，信道利用率低
- 节省了载波发射功率
- 过零调制导致包络失真，接收时不能用包络检波，只能做相干解调

■ DSB-SC时域和频域特性



2. 标准振幅调制AM（常规调幅）

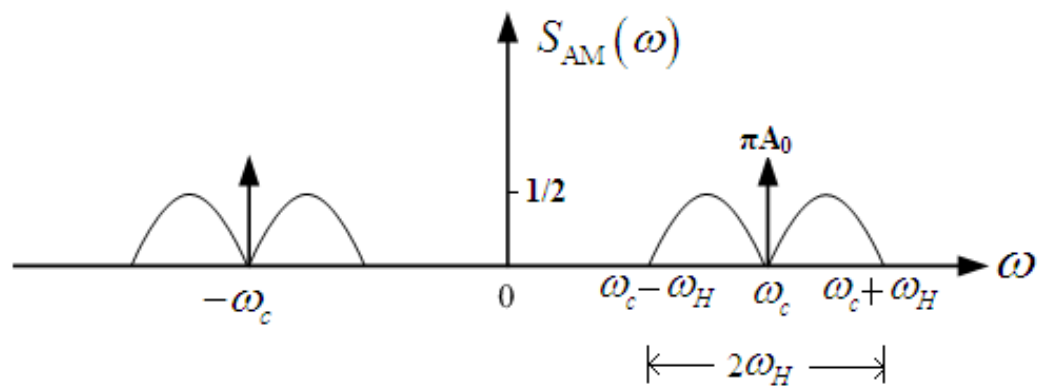
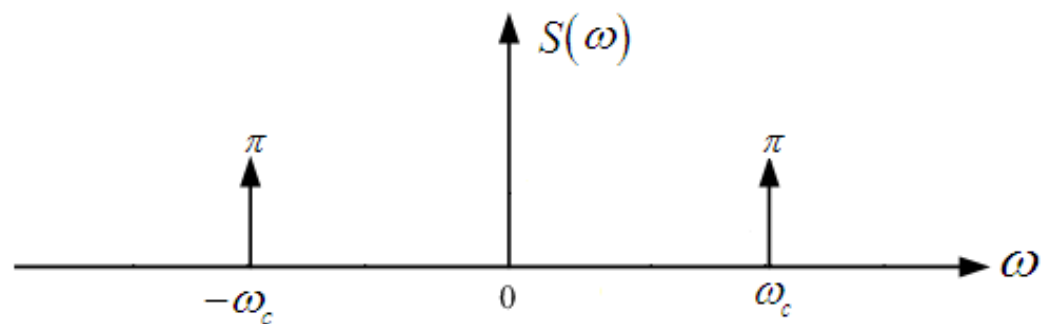
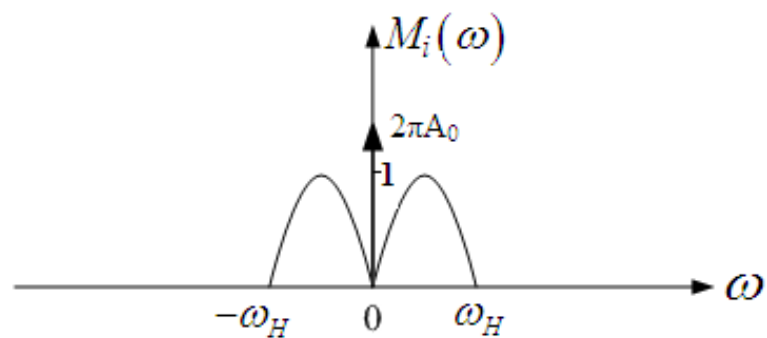
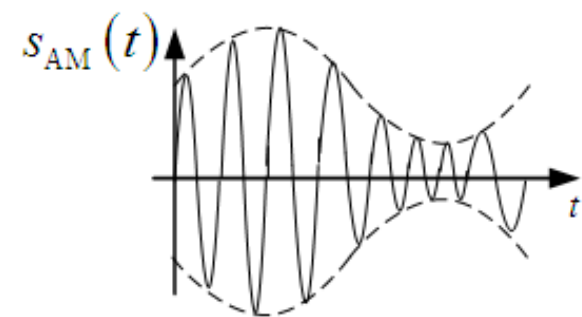
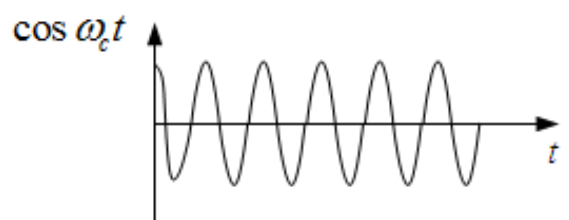
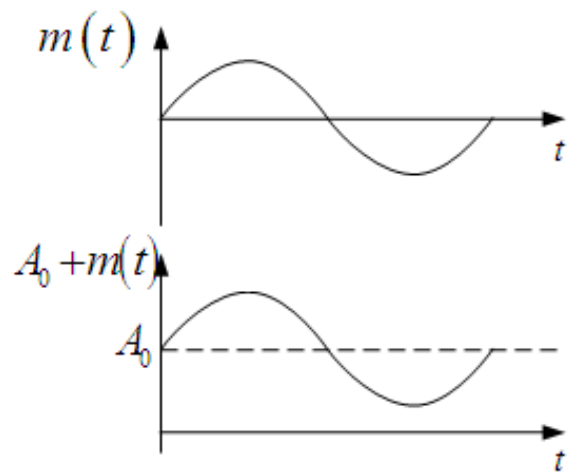
■ 模型



■ 设 $h(t)$ 为理想带通滤波器, $B_{AM} = 2f_H$

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

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





■ 调制效率

$$\eta_{AM} = \frac{\text{边带功率}}{\text{平均功率}} = \frac{P_s}{P_c + P_s}$$

P_c 为载波功率， P_s 为边带功率

AM信号的平均功率为：

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

$A_0 = |m(t)|_{\max}$ ，称为满调制，效率最高

$m(t)$ 与载波相互独立

$$\overline{m(t)} = 0$$

■ 推导

$$P_{AM} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S_m^2(t) dt = \overline{S_m^2(t)}$$

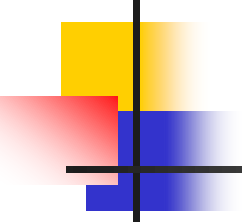
$$= \overline{[A_0 + m(t)]^2 \cos^2 \omega_c t}$$

$$= \overline{A_0^2 \cos^2 \omega_c t + m^2(t) \cos^2 \omega_c t + 2A_0 m(t) \cos^2 \omega_c t}$$

$$= \frac{A_0^2}{2} (1 + \cos 2\omega_c t) + \frac{m^2(t)}{2} (1 + \cos 2\omega_c t) + A_0 m(t) (1 + \cos 2\omega_c t)$$

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

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

- 
- 例： $m(t)$ 为单频正弦信号，求满调制时 AM 信号的调制效率？

$$\text{设 } m(t) = A_m \cos \omega_m t, \quad s(t) = \cos \omega_c t$$

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

$$\text{满调制时, } A_0 = |A_m|$$

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

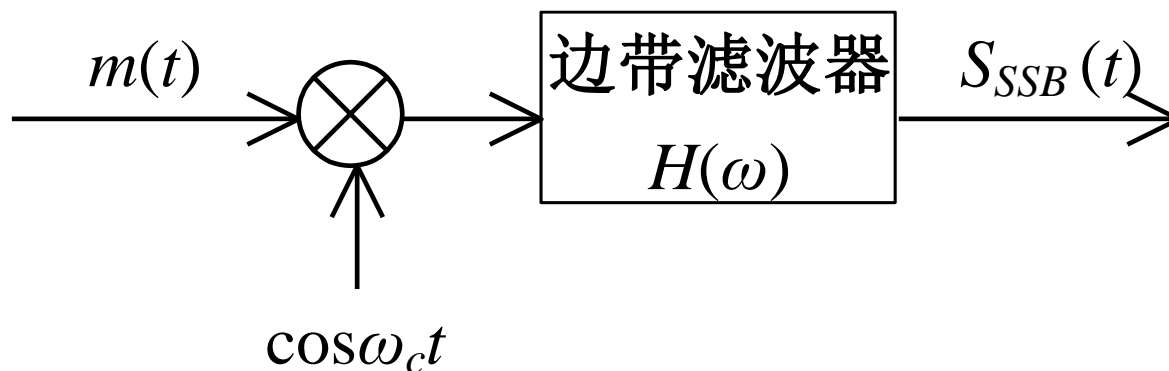


3. 单边带调制SSB

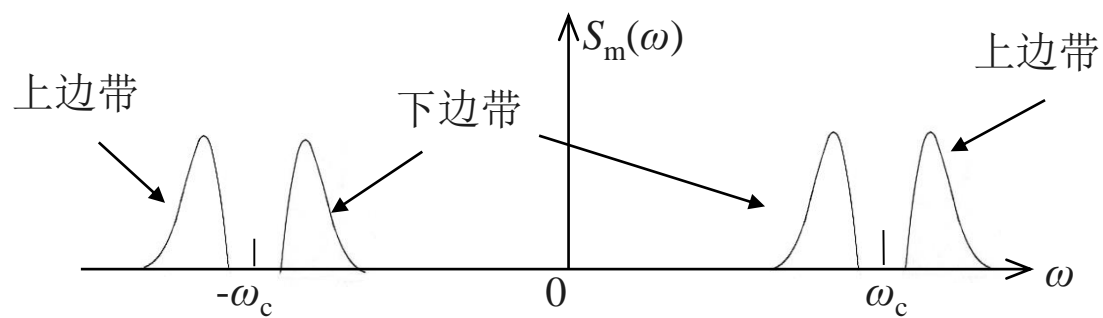
- 双边带信号两个边带中的任意一个都包含了调制信号频谱 $M(\omega)$ 的所有频谱成分，因此仅传输其中一个边带即可。这样**节省一半传输频带，节省发送功率**，这种方式称为单边带调制
- 产生SSB信号的常用方法有两种：滤波法和相移法



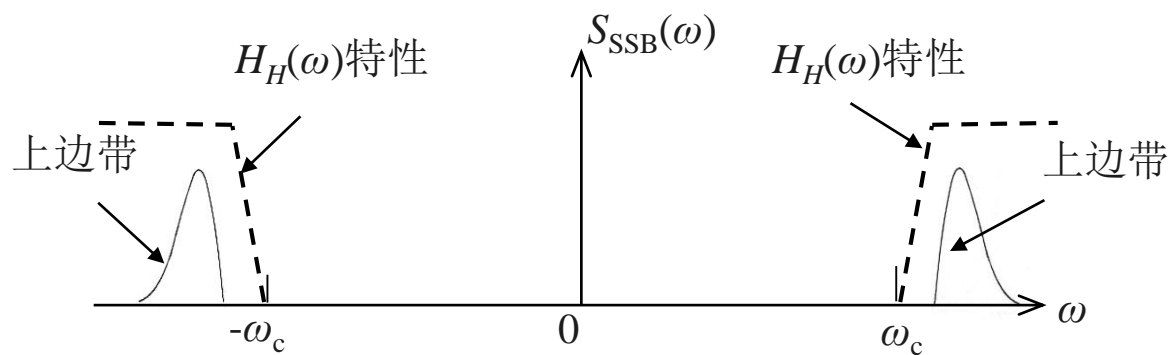
■ 边带滤波法



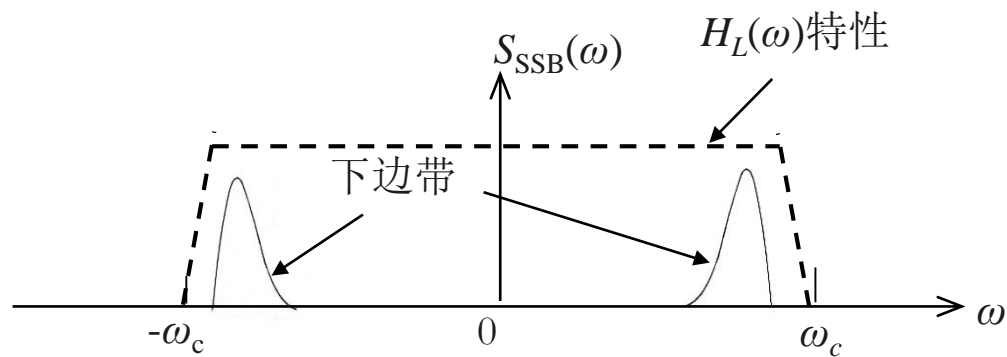
- $H(\omega)$ 为低通/带通滤波器时，提取下边带
- $H(\omega)$ 为高通/带通滤波器时，提取上边带



(a) 滤波前信号频谱



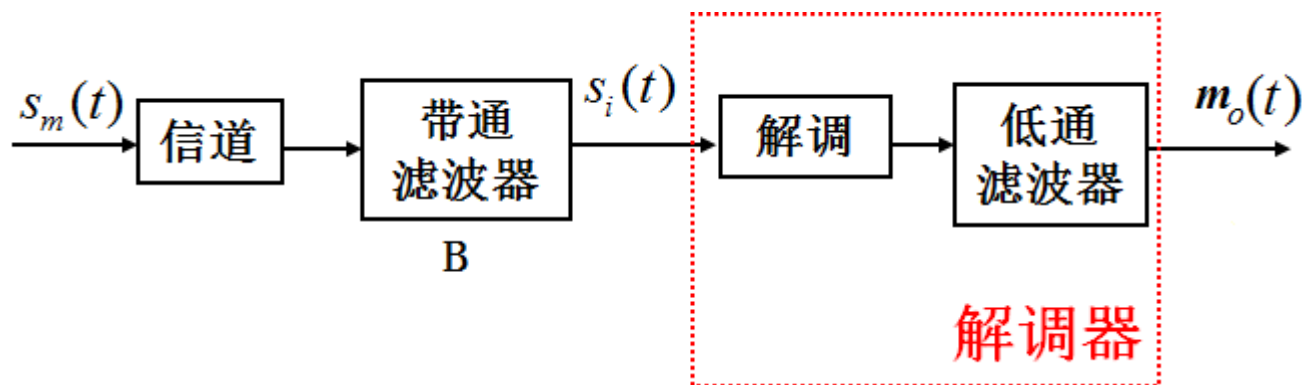
(b) 上边带滤波器特性和信号频谱

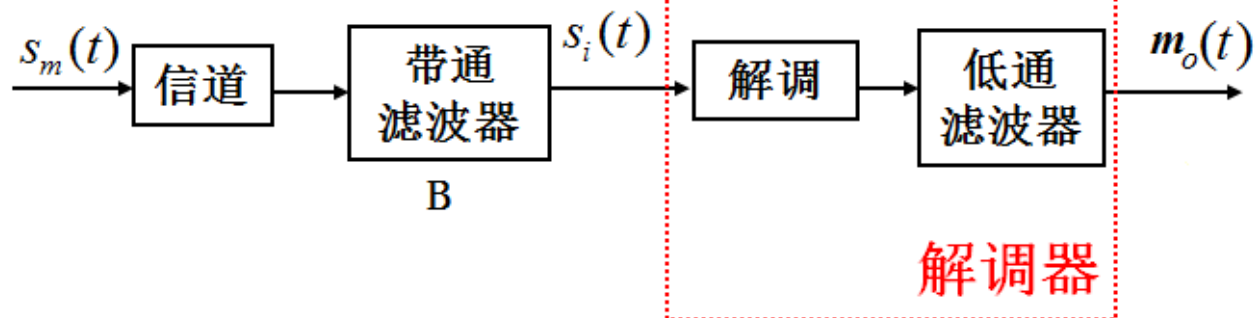


(c) 下边带滤波器特性和信号频谱

二. 调幅信号的解调

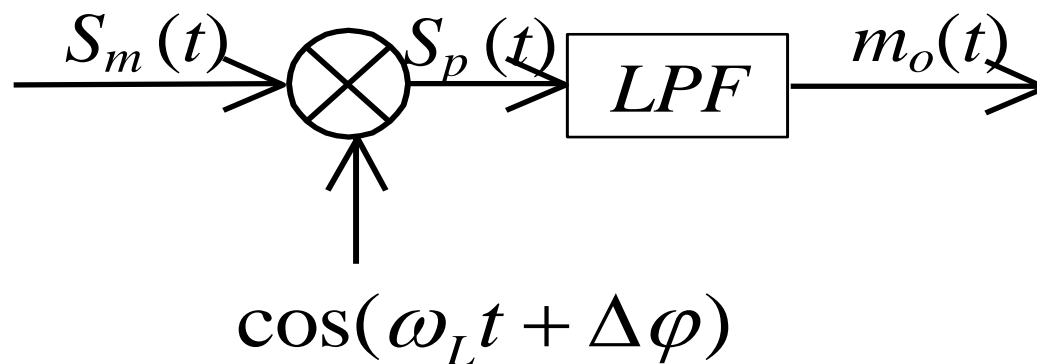
- 相干解调：适用于所有类型的幅度调制系统，相干载波要与调制载波同步
- 包络检波：适用于已调信号包络与调制信号的形状完全相同的情况下的解调，结构简单，用于AM解调



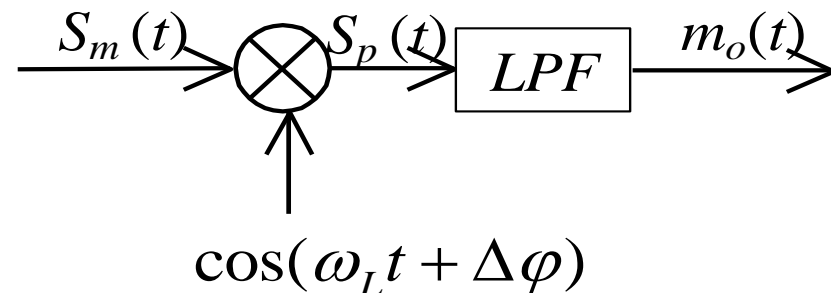


■ 相干解调（同步检测）

- 适用于所有幅度调制方式
- 不考虑噪声影响，信号无失真传输



- 相干解调成立条件：同频 $\omega_L = \omega_c$
同相 $\Delta\varphi = 0$



说明

- 假设本地载波 $\cos(\omega_L t + \Delta\varphi)$

$$s_m(t) = m(t) \cos \omega_c t$$

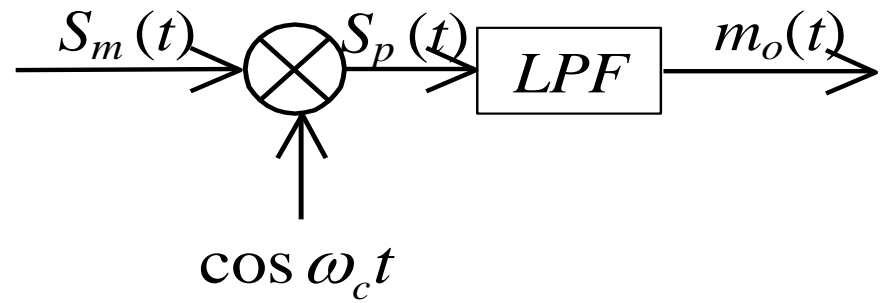
$$\begin{aligned} s_p(t) &= s_m(t) \cos(\omega_L t + \Delta\varphi) = m(t) \cos \omega_c t \cdot \cos(\omega_L t + \Delta\varphi) \\ &= \frac{1}{2} m(t) \{ \cos[(\omega_c + \omega_L)t + \Delta\varphi] + \cos[(\omega_c - \omega_L)t - \Delta\varphi] \} \end{aligned}$$

$$LPF: \quad m_o(t) = \frac{1}{2} m(t) \cos[(\omega_c - \omega_L)t - \Delta\varphi]$$

若 $\omega_c - \omega_L \neq 0$ ，则存在低频调制

若 $\omega_c = \omega_L$ ，则： $m_o(t) = \frac{1}{2} m(t) \cos \Delta\varphi$ ，有衰减

故：当 $\omega_c = \omega_L$ ， $\Delta\varphi = 0$ ，时， $m_o(t) = \frac{1}{2} m(t)$



■ DSB相干解调

$$s_m(t) = m(t) \cos \omega_c t$$

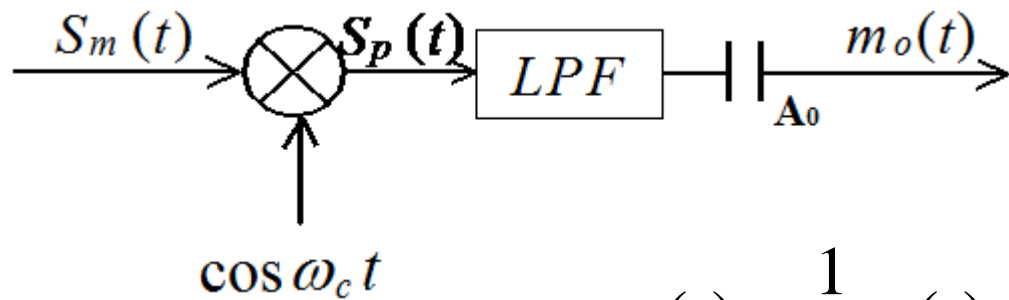
$$s_p(t) = s_m(t) \cos \omega_c t = m(t) \cos^2 \omega_c t$$

$$= \frac{1}{2} m(t) + \frac{1}{2} m(t) \cos 2\omega_c t$$

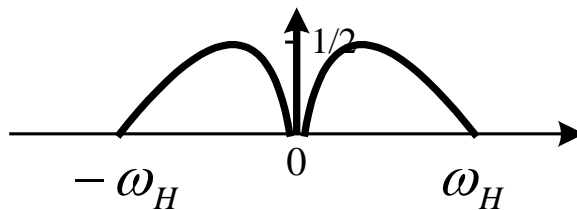
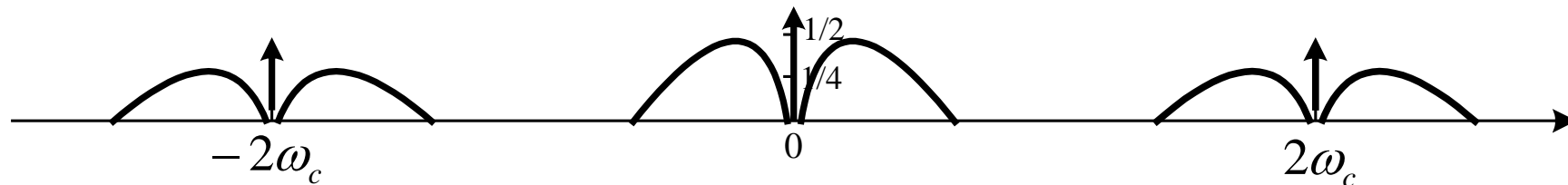
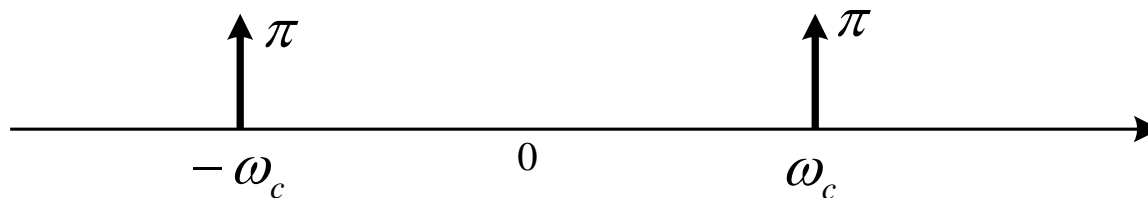
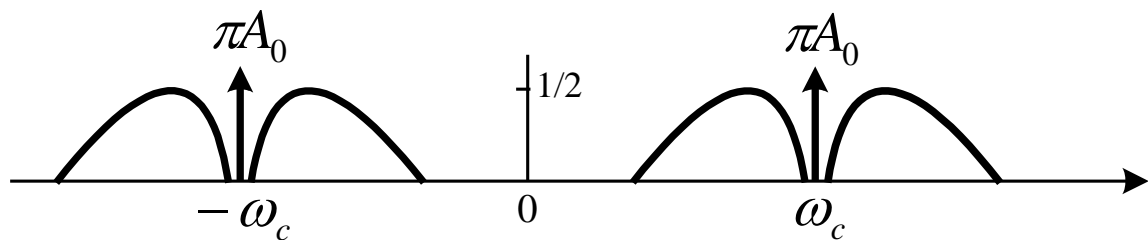
$$S_p(\omega) = \frac{1}{2} M(\omega) + \frac{1}{4} [M(\omega + 2\omega_c) + M(\omega - 2\omega_c)]$$

$$m_o(t) = \frac{1}{2} m(t)$$

AM相干解调

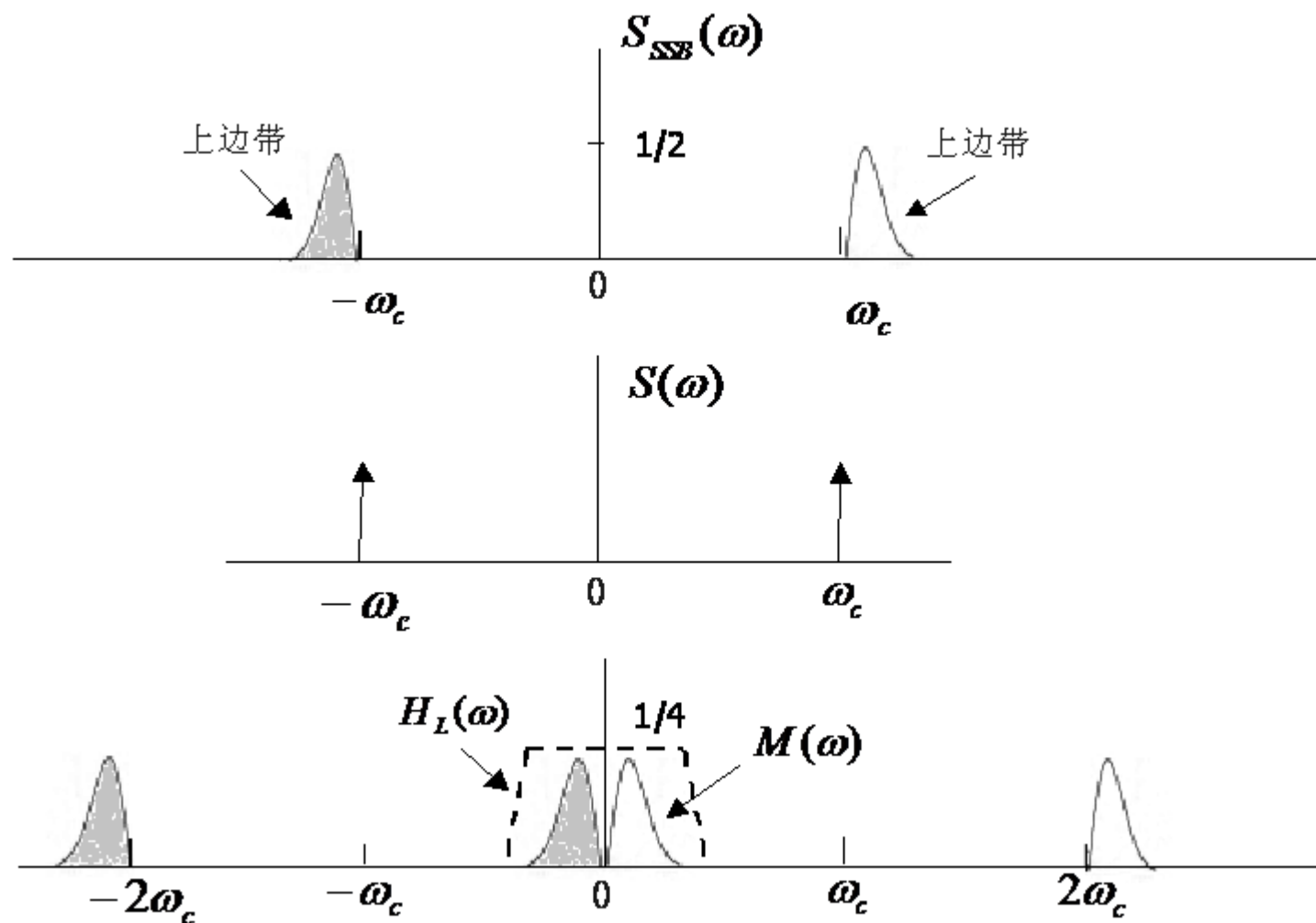


$$m_o(t) = \frac{1}{2} m(t)$$



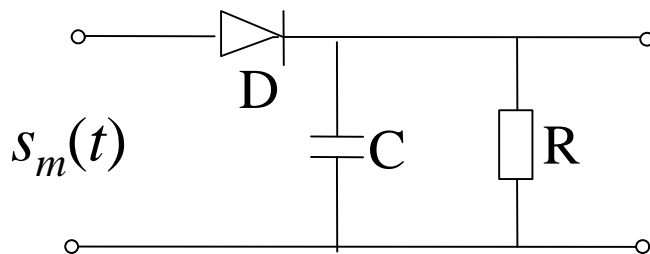
SSB相干解调

$$m_o(t) = \frac{1}{4} m(t)$$

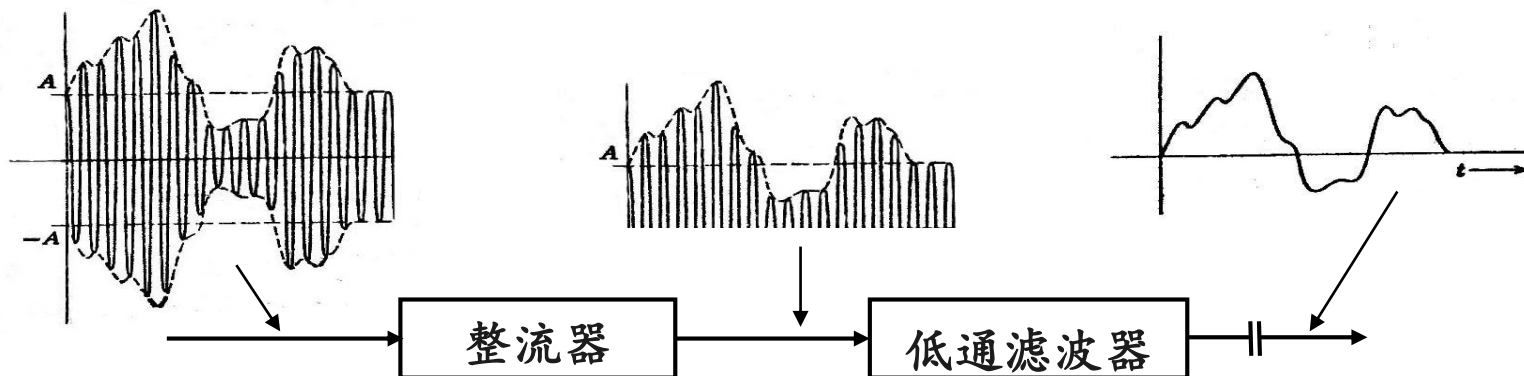


■ 包络检波（非相干解调）

- 适用条件：已调信号包络与调制信号相同时，AM信号解调通常的方法，且要求 $A_0 \geq |m(t)|_{\max}$

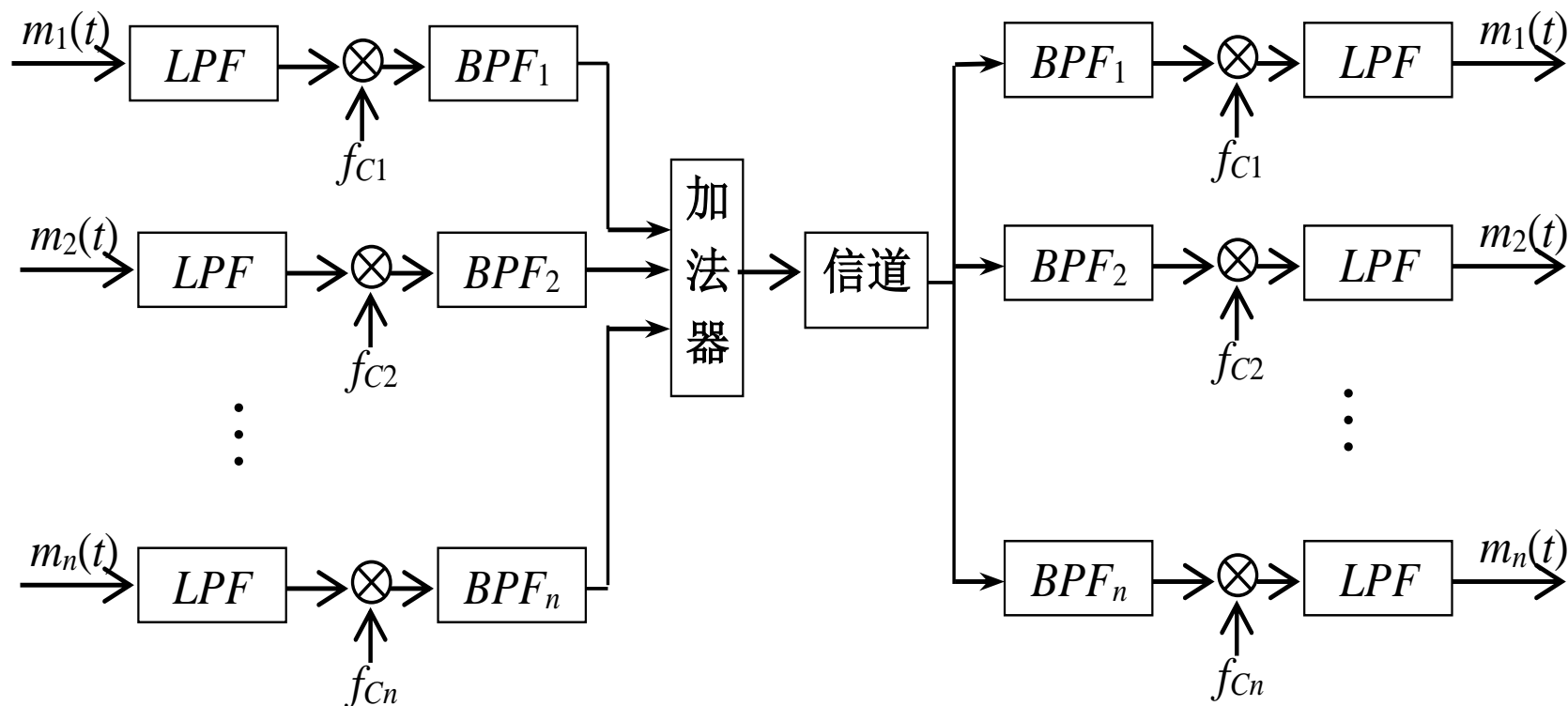


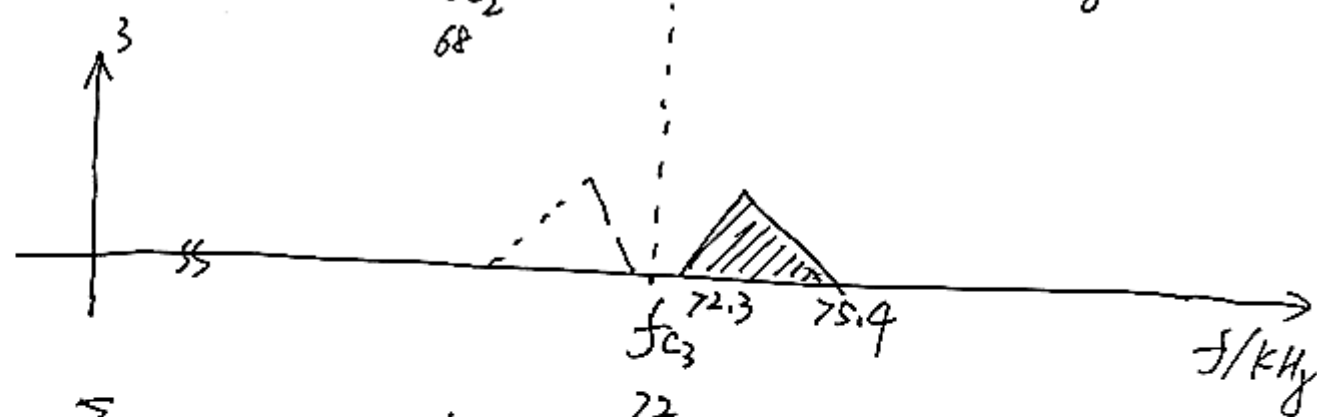
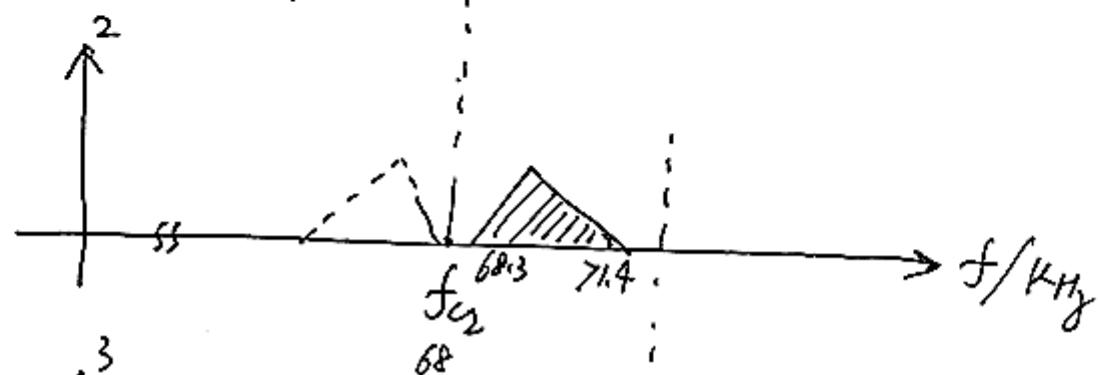
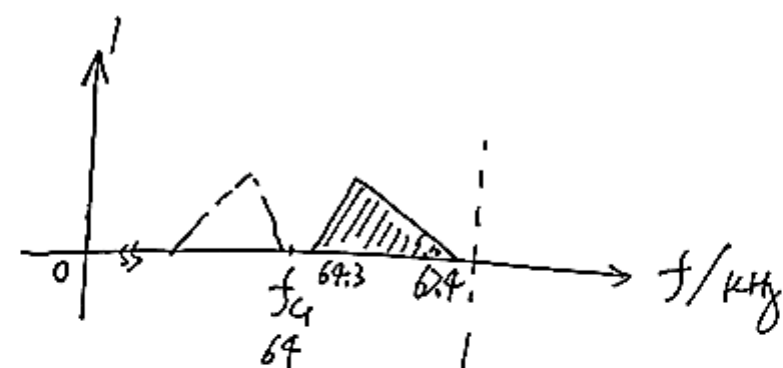
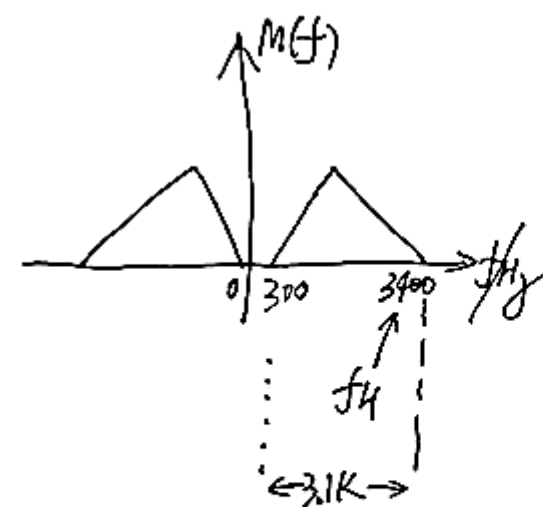
$$m_o(t) = m(t)$$



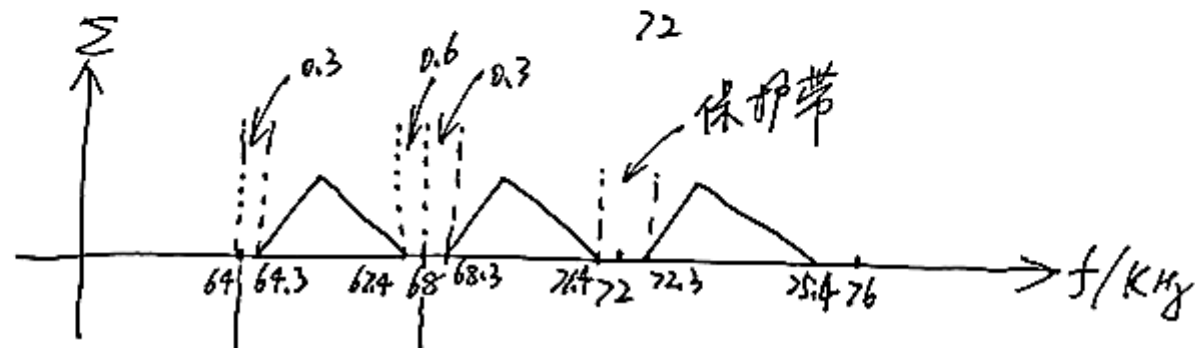
5.3 频分复用及应用

- 频分复用（FDM）的目的是同时传输多路信号，分占不同频段，提高信道利用率

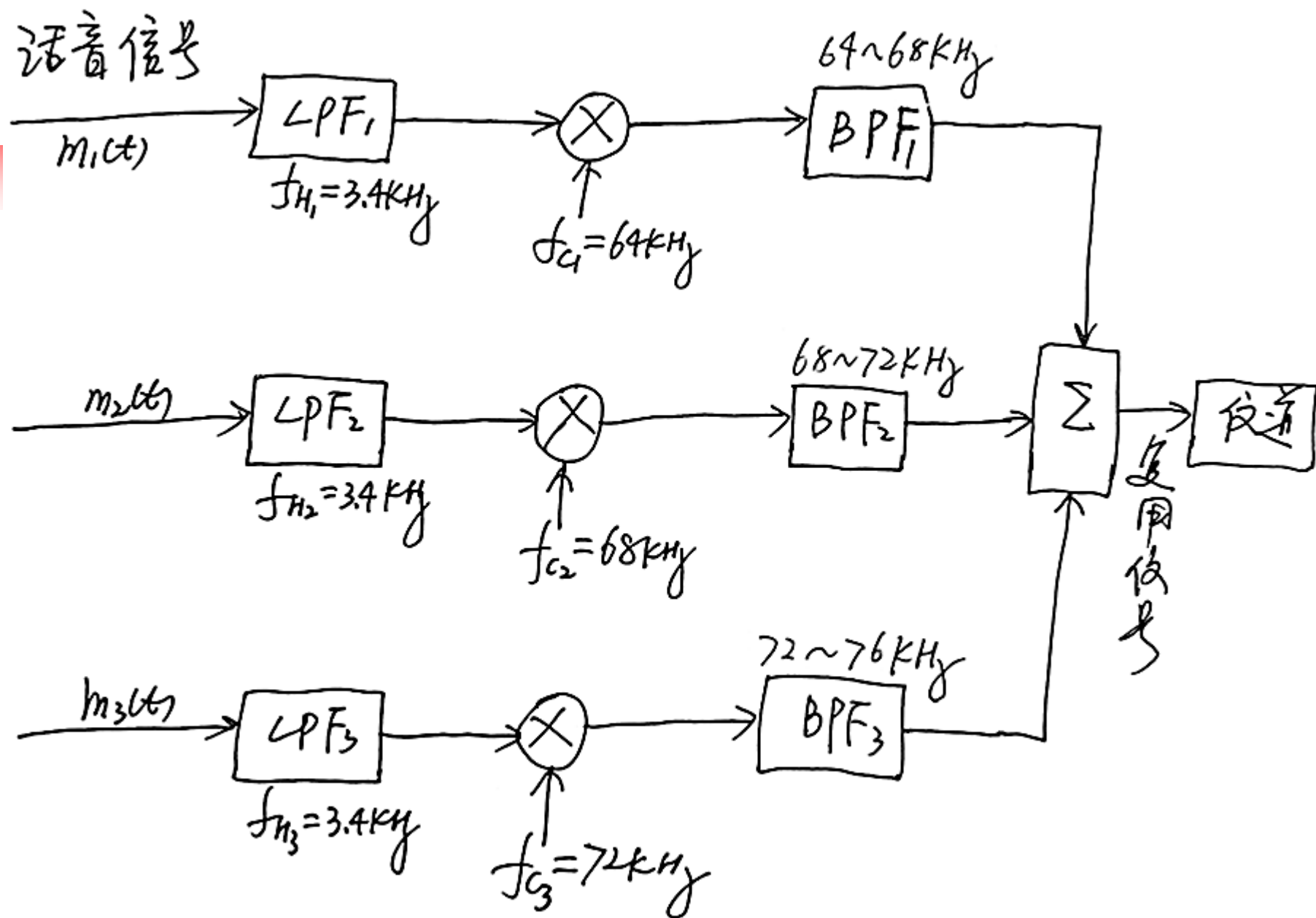


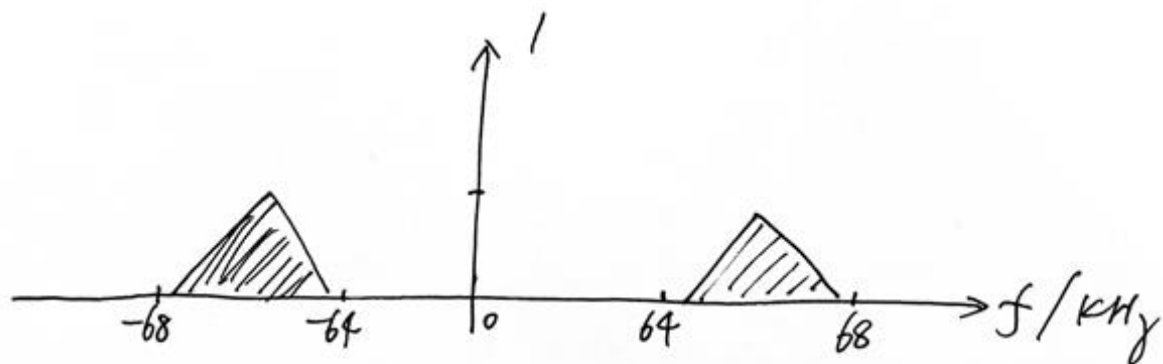
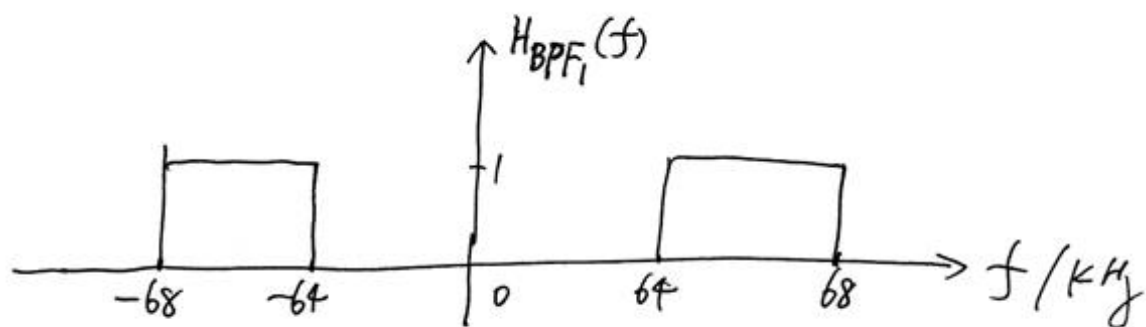
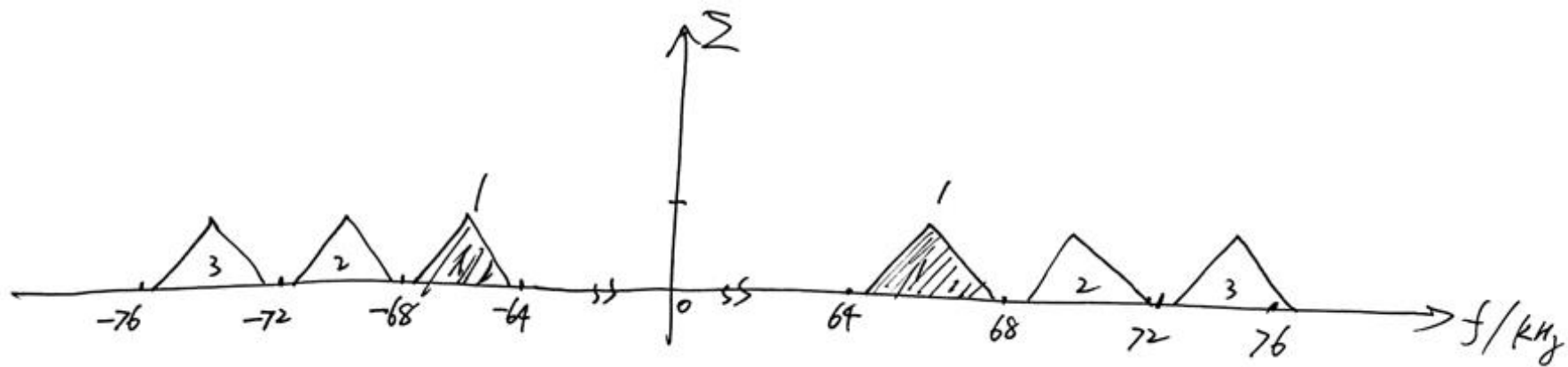


一路语音信号带宽
 $3.1K + 0.9K = 4KHz$
 三路复用 $12KHz$

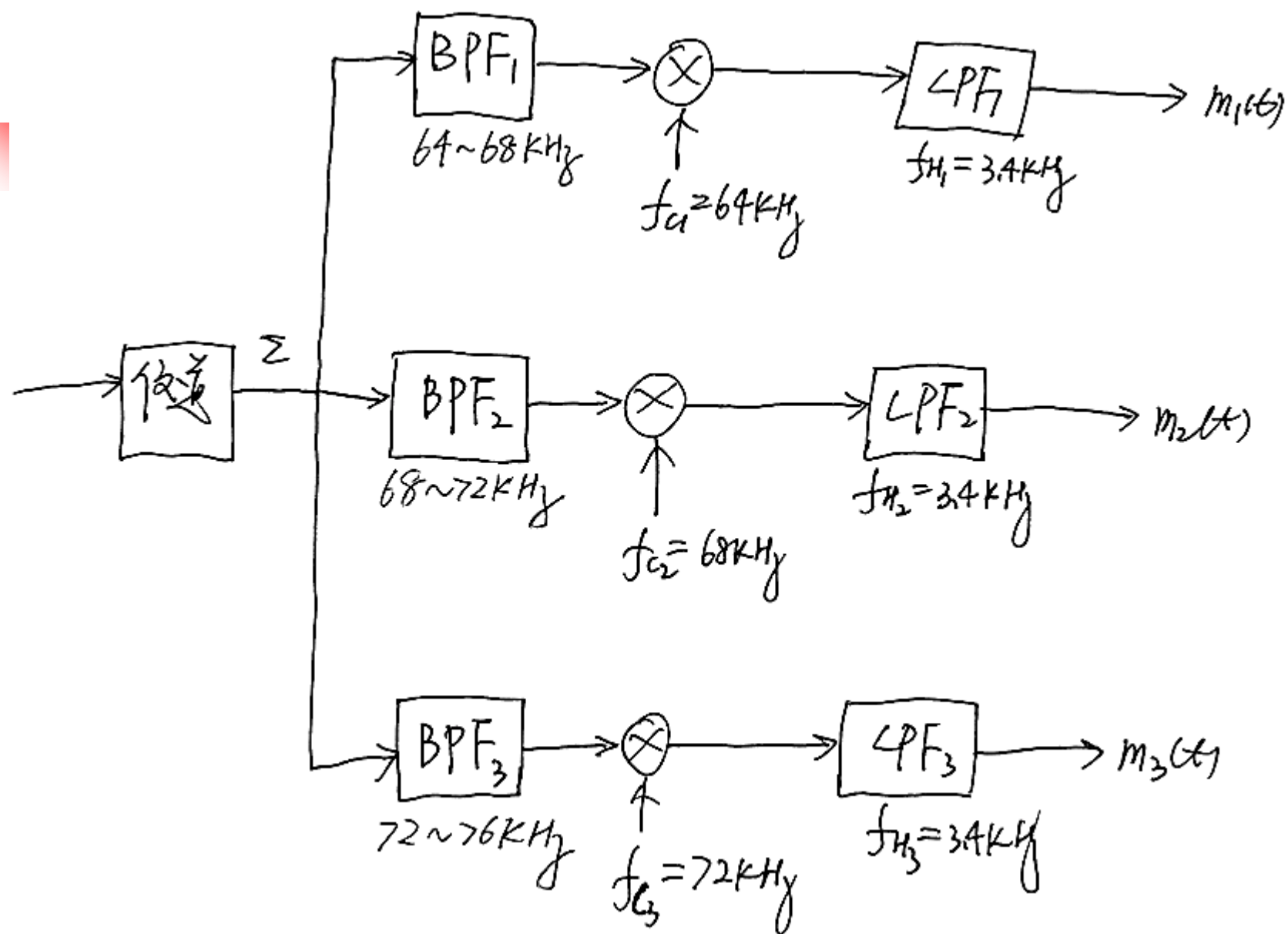


语音信号





解复用





典型应用

■ 多路载波电话系统

- 采用**SSB调制，频分复用**技术来节省传输频带
- 每路电话信号限带 $300\sim 3400\text{Hz}$ ($f_m=3.1\text{KHz}$)，SSB调制后，为便于接收，另加 900Hz 保护频带 ($f_g=0.9\text{KHz}$)，因此**每路载波电话取 4KHz 作为标称带宽**
- 各路载频选择满足： $f_{C_{i+1}} = f_{C_i} + (f_m + f_g)$
- N 路复用后总频带为：
$$B_N = N(f_m + f_g)$$



■ 大容量载波电话系统多级调制

| 分群等级 | 容量（路数） | 带宽KHz | 基本频带KHz |
|---------|-----------------------|---------|------------|
| 基群 | 12 | 48 | 60~108 |
| 超群 | $5 \times 12 = 60$ | 240 | 312~552 |
| 基本主群 | $5 \times 60 = 300$ | 1200 | 812~2044 |
| 基本超主群 | $3 \times 300 = 900$ | 3600 | 8516~12388 |
| 12MHz系统 | $3 \times 900 = 2700$ | 10.8MHz | |



本章小结

- 调制的基本概念和数学本质
- 调幅信号产生和接收原理
- 调制效率的概念
- 频分复用的概念



作业

- 阅读教材第五章5.1和5.5的内容
- 第五章习题
 - 1 (提示: $m = A_m/A_0 = 60\%$)
 - 4 (不写单边带信号表达式, 只画出频谱图)
- 补充题
 - $m(t)$ 为单频正弦信号, 求满调制时AM信号的调制效率。