



# 第六章 调幅与检波

## 6.1 调幅原理

## 6.2 调幅电路

## 6.3 调幅波的解调-检波

# 6.1 调幅原理



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## 6.1.1 概述

基带信号  
(低频宽带)  $\left\{ \begin{array}{l} \text{音频: } 20\text{Hz} \sim 20\text{KHz} \\ \text{视频: } 0 \sim 6\text{MHz (隔行扫描)} \end{array} \right.$

### 1. 调制的必要性

直接发射存在两大困难:  $\left\{ \begin{array}{l} \text{① 天线长度需为波长的} 1/4 \text{ 以上;} \\ \text{② 接收时无法区分从不同源来的信号。} \end{array} \right.$

### 2. 调制的定义

① 用基带信号线性地控制高频载波的某个参数, 把要发送的信号“寄托”即调制在所选参数上, 达到利用高频电磁波传送此信息的目的。

② 将低频宽带信号变成高频窄带谱, 已调高频正弦波具有频率高, 相对带宽小, 各路信号谱互不重叠的特点。。

③ 不同电台指定不同载波频率 (由国家相关部门指定)。

### 3. 分类

① **模拟调制**: 正弦载波OSC; 调幅 (AM)、调频 (FM)、调相 (PM)。

② **数字调制**: 矩形脉冲载波; 幅移键控 (ASK), 相移键控 (PSK), 频移键控 (FSK)。

# 6.1 调幅原理



## 6.1.2 调幅波表示

### 1. 一般调幅波

用低频宽带信号  $s(t)$  线性改变载波的幅度。

$$u = A_o \cos \omega_c t \rightarrow \text{载波} \quad A_o - \text{未调制时载波的幅度}$$

$$u_{AM} = A_o [1 + ms(t)] \cos \omega_c t = A(t) \cos \omega_c t$$

$$\overline{s(t)} = 0 (\text{均值为} 0)$$

$$s(t): \begin{cases} s(t)_{\max} = 1 (\text{经归一化处理}) \\ f_{\min} < f < f_{\max} (\text{带限信号}) \end{cases}$$

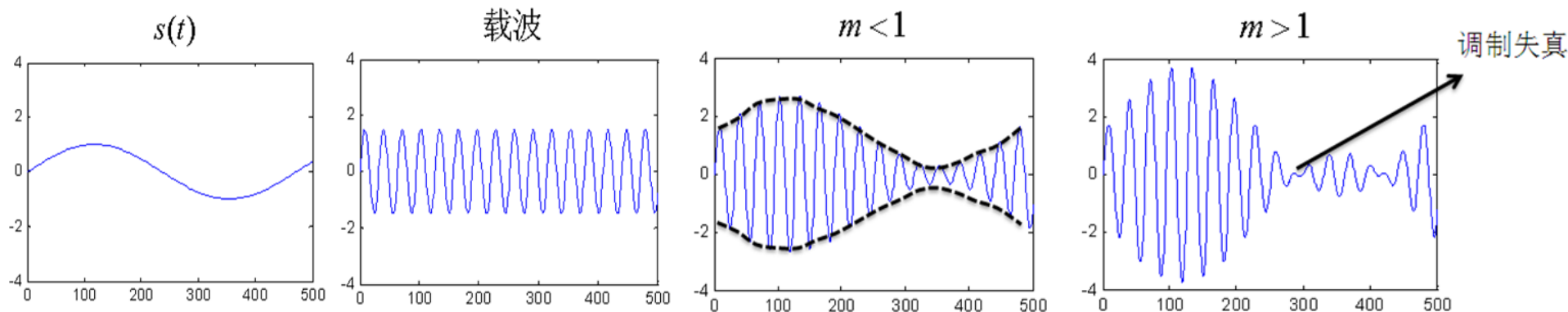
$m$ : 调幅指数 (调制度),  $m \leq 1$

$$m = \frac{A_o(1+m) - A_o(1-m)}{A_o(1+m) + A_o(1-m)} = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}}$$

$m$  越大, 表示调制波幅度变化越大。

### ① 时域波形

上下包络都反映调制信号的变化



# 6.1 调幅原理



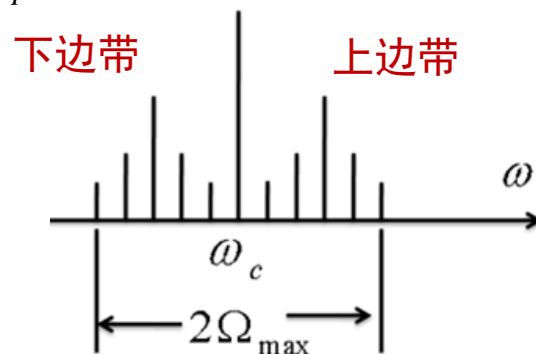
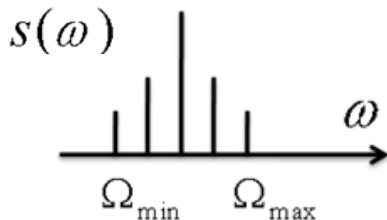
## ② 频谱图

$$\text{设 } s(t) = \sum_{n=p}^q a_n \cos n\Omega_d t$$

$$u_{AM} = A_o[1 + ms(t)]\cos \omega_c t$$

$$u_{AM} = A_o \cos \omega_c t + \frac{1}{2}mA_o \sum_{n=p}^q a_n \cos(\omega_c + n\Omega_d)t + \frac{1}{2}mA_o \sum_{n=p}^q a_n \cos(\omega_c - n\Omega_d)t$$

带宽:  $BW = 2\Omega_{\max}$



## ③ 调幅波的平均功率

平均功率

$$P = \frac{\overline{U_{AM}^2}}{R} = \overline{A_o^2 [1 + 2ms(t) + m^2 s^2(t)] \cos^2 \omega_c t}$$

$$= \frac{1}{2} A_o^2 \left[ 1 + \overline{m^2 s^2(t)} \right] = \frac{1}{2} A_o^2 + \frac{1}{2} A_o^2 \overline{m^2 s^2(t)}$$

$$\text{若 } s(t) = \cos \Omega t \quad \frac{1}{2} A_o^2 + \frac{1}{4} A_o^2 m^2 = P_c + P_m$$

载波平均功率

携带信息的边带能量

$$\eta_{\text{发}} = \frac{P_m}{P_c + P_m} = \frac{\frac{1}{4} A_o^2 m^2}{\frac{1}{2} A_o^2 + \frac{1}{4} A_o^2 m^2}$$

$$= \frac{\frac{1}{2} m^2}{\frac{1}{2} m^2 + 1} \quad \text{若 } m=0.3 \quad = 5\%$$

# 6.1 调幅原理



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## ④一般调幅波优缺点

**缺点：**

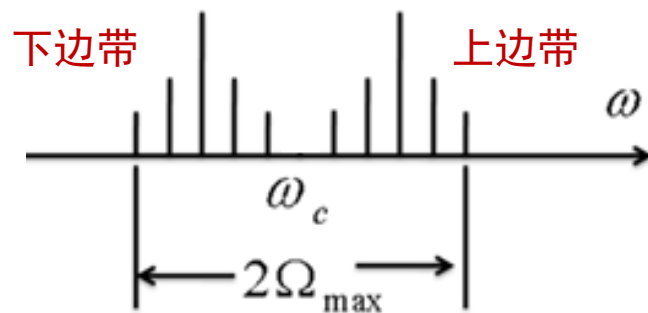
- a. 携带的信息功率只占平均功率很小的一部分， $\eta_{\text{发}}$  极低；
- b.  $BW = 2\Omega_{\text{max}}$ ，浪费频带。

**优点：** 接收机成本低，解调简单，目前在民用广播中被广泛使用。

## 2. 抑制载波的双边带调幅 (DSB)

**目的：** 提高  $\eta_{\text{发}}$ ，没有载波频率。

$$u_{DSB} = As(t) \cos \omega_c t$$



$$BW = 2\Omega_{\text{max}}$$

$$\begin{aligned} s(t) &= \cos \Omega t \\ &= \frac{1}{2} A \cos(\omega_c + \Omega)t + \frac{1}{2} A \cos(\omega_c - \Omega)t \end{aligned}$$

# 6.1 调幅原理



DSB波形的两个特点：

①在  $s(t)=0$  两旁，由于调制信号的值正负发生了变化，已调波的相位发生  $180^\circ$  突变。

$$s(t) > 0 \quad u_{DSB} = A|s(t)|\cos\omega_c t$$

$$s(t) < 0$$

$$u_{DSB} = -A|s(t)|\cos\omega_c t = A|s(t)|\cos(\omega_c t + \pi)$$

②上下包络均不同于调制信号的变化形状。

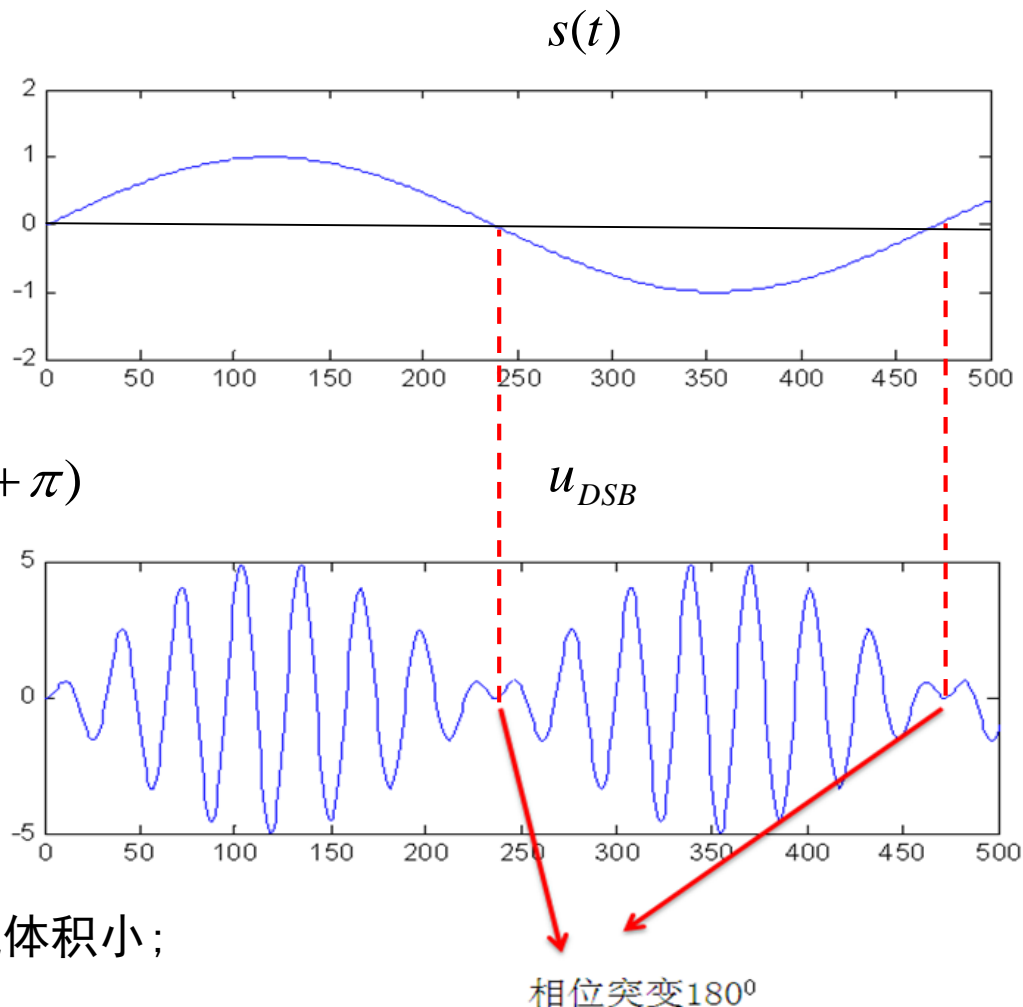
正峰值包络为  $|s(t)|$

负峰值包络为  $-|s(t)|$

DSB特点：①没有载波， $\eta_{\text{发}}$  高，发射机体积小；

②  $BW = 2\Omega_{\text{max}}$

③解调困难（采用载波恢复电路，电路复杂，目前可用一个芯片解决）。



# 6.1 调幅原理



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## 3. 抑制载波的单边带调幅 (SSB)

目的：减小带宽。

$$\begin{aligned} u_{SSB} &= \sum_{n=p}^q a_n \cos(\omega_c + n\Omega_d)t \\ &= \cos \omega_c t \sum_{n=p}^q a_n \cos n\Omega_d t - \sin \omega_c t \sum_{n=p}^q a_n \sin n\Omega_d t \\ &= s(t) \cos \omega_c t - x(t) \sin \omega_c t \end{aligned}$$

$x(t) - s(t)$ 的希尔伯特信号，由  $s(t)$  的每一个频谱分量幅度不变地移相 $90^\circ$ 后叠加而成。

$$\text{若 } s(t) = \cos \Omega t \Rightarrow u_{SSB} = \cos \Omega t \cos \omega_c t - \sin \Omega t \sin \omega_c t = \cos(\omega_c + \Omega)t$$

SSB特点：

①占有频带特别窄，所有手机均使用SSB；

②解调麻烦，不能用解调一般调幅波的方法，现已全部解决

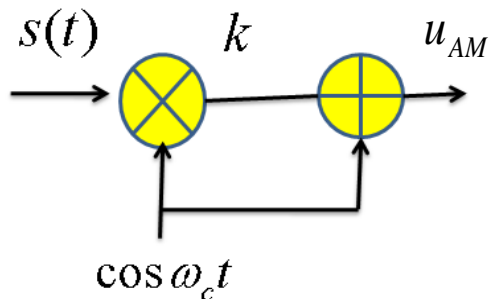
## 6.2 调幅电路



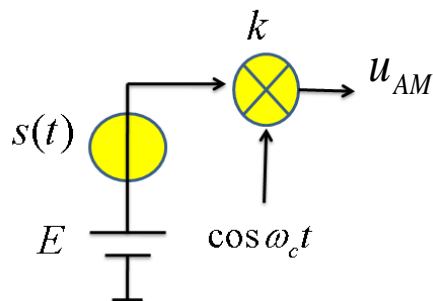
### 6.2.1 低电平调幅

(适用于小功率发射机)

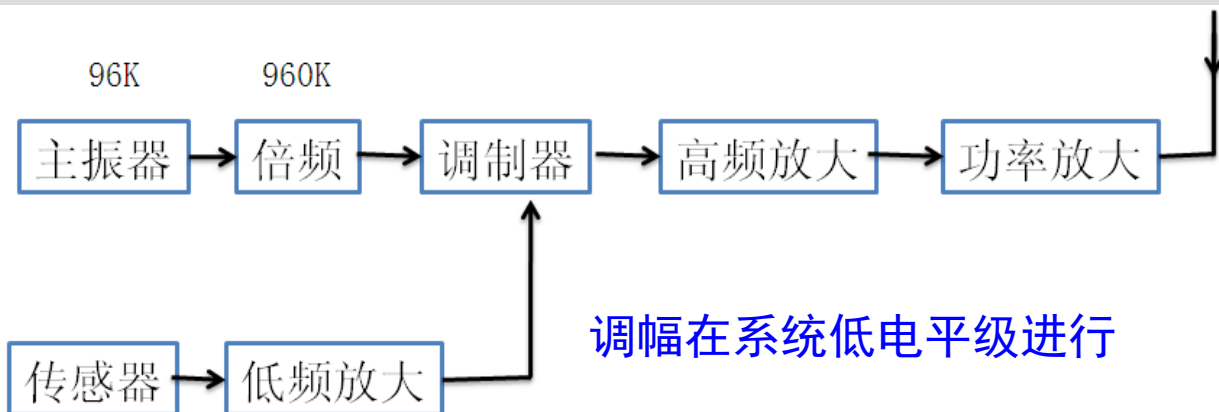
用乘法器实现



$$\begin{aligned} u_{AM} &= \cos \omega_c t + k s(t) \cos \omega_c t \\ &= [1 + k s(t)] \cos \omega_c t \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} u_{AM} &= k[E + s(t)] \cos \omega_c t \\ &= kE \left[ 1 + \frac{1}{E} s(t) \right] \cos \omega_c t \\ E &> 1V \end{aligned}$$



**优点：**起调幅作用的非线性器件工作中、小信号状态，较易获得好的调幅线性，调幅波的调制度等参数调节也较容易。

教材107页图6.2.2所示为用**变跨导式乘法器**MC1496/1596实现的调幅电路，图6.2.3所示为利用**双平衡二极管准模拟乘法器**实现DSB信号。

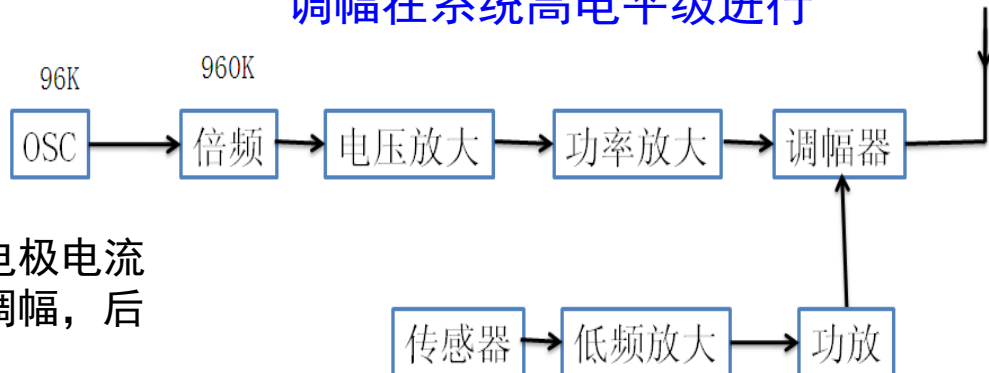


## 6.2 调幅电路



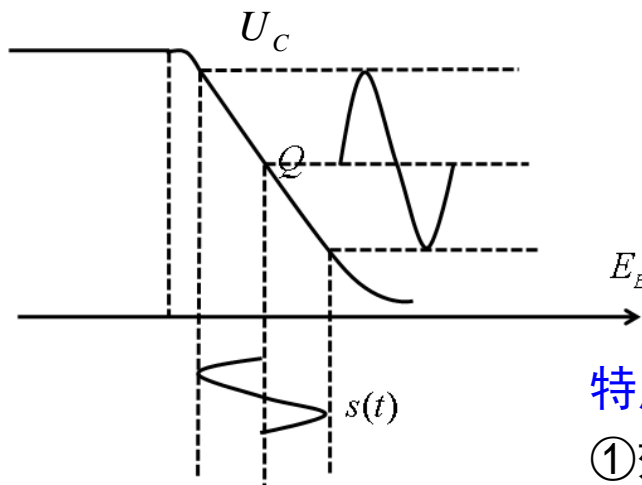
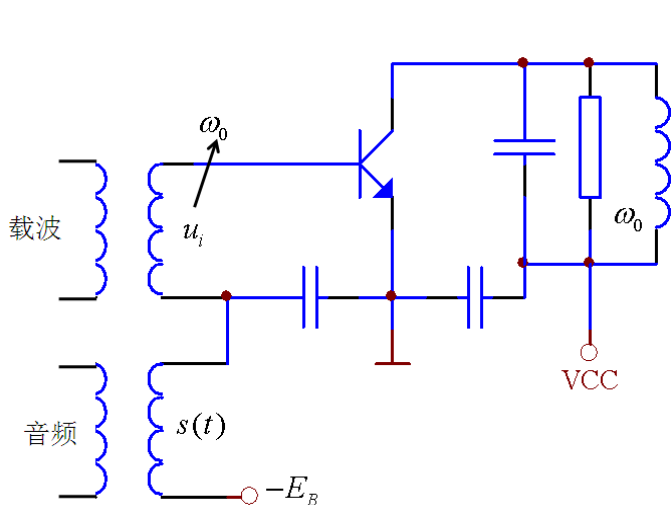
### 6.2.2 高电平调幅

调幅在系统高水平级进行



高电平调幅电路实质上是基极偏压或集电极电流可变的谐振功率放大器，前者称为基极调幅，后者称为集电极调幅。

#### 1. 基极调幅：用 $s(t)$ 控制 $-E_B$ ，基极调制特性



$S(t)$  叠加在 $E_B$ 上，由于线性关系所以得到的输出为正弦。

当无低频信号输入时，输出为高频振荡信号；当加入低频信号时，输出为已调信号；为保证调幅的线性，谐振功率放大器必须工作在欠压状态下，而且要适当地选择导通角。

特点：

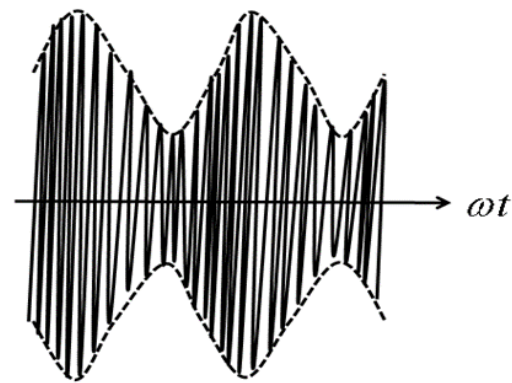
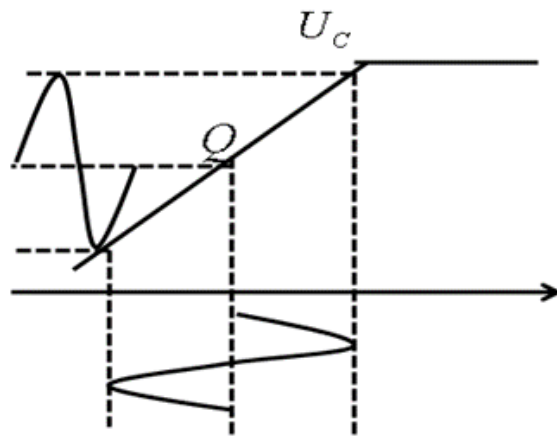
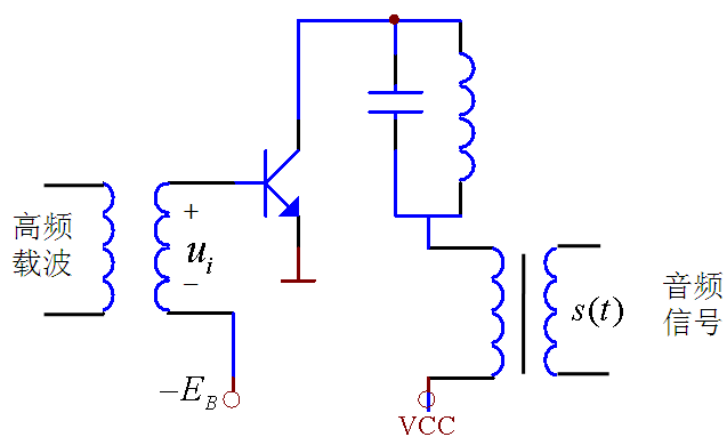
- ①效率  $\eta$  发低；
- ②对 $s(t)$ 源无特别功率要求；
- ③调幅线性较差。

## 6.2 调幅电路



### 2. 集电极调幅：用 $s(t)$ 控制 $V_{CC}$ ，集电极调制特性

过压区： $\varphi$ 不变，电流凹陷严重， $I_{C1}, I_{C0}$ 随 $V_{CC}$ 增大而增大， $I_{C1}$ 与 $U_c$ 成近似线性关系，这种特性称为集电极调制特性，利用此特性可产生调幅波。



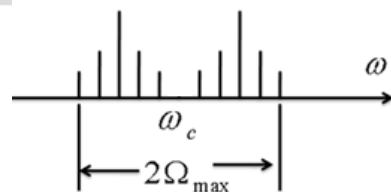
特点：

- ①效率  $\eta_{\text{发}}$  高；
- ② $s(t)$  源为功放；
- ③调幅线性较差。

改善方法：

- ①自生负偏压法；
- ②双重调幅法。

## 6.2 调幅电路

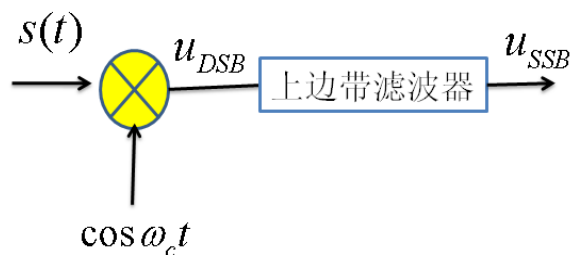


### 6.2.2 单边带信号的产生

#### 1. 滤波法

由DSB信号经过一单边带滤波器而得到。

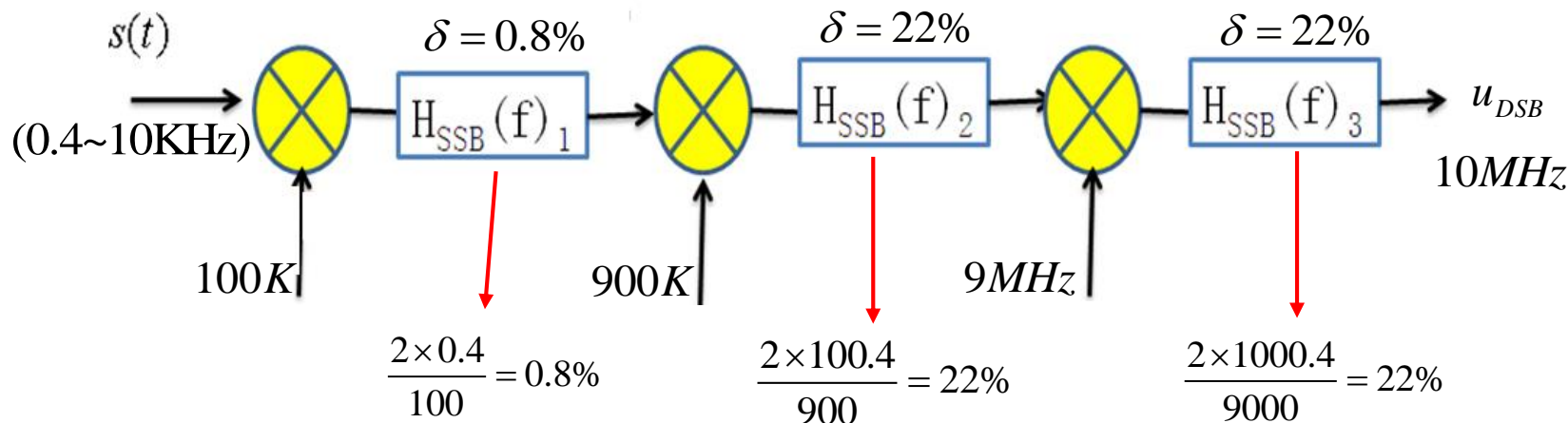
**局限性：**上、下边带距离较近，要求滤波器有极其陡峭的特性，实际不可实现。



**相对距离** 
$$\delta = \frac{[\omega_c + \Omega_{\min}] - [\omega_c - \Omega_{\min}]}{\omega_c} = \frac{2\Omega_{\min}}{\omega_c}$$

$$\begin{aligned} \omega_c &= 10M \\ \Omega_{\min} &= 0.4K \\ &= \frac{2 \times 0.4 \times 10^3}{10M} = 0.008\% \end{aligned}$$

**解决办法：**降低  $\omega_c$ ，增大  $\delta$ ，采用多级DSB调制、多级单边带滤波的方法



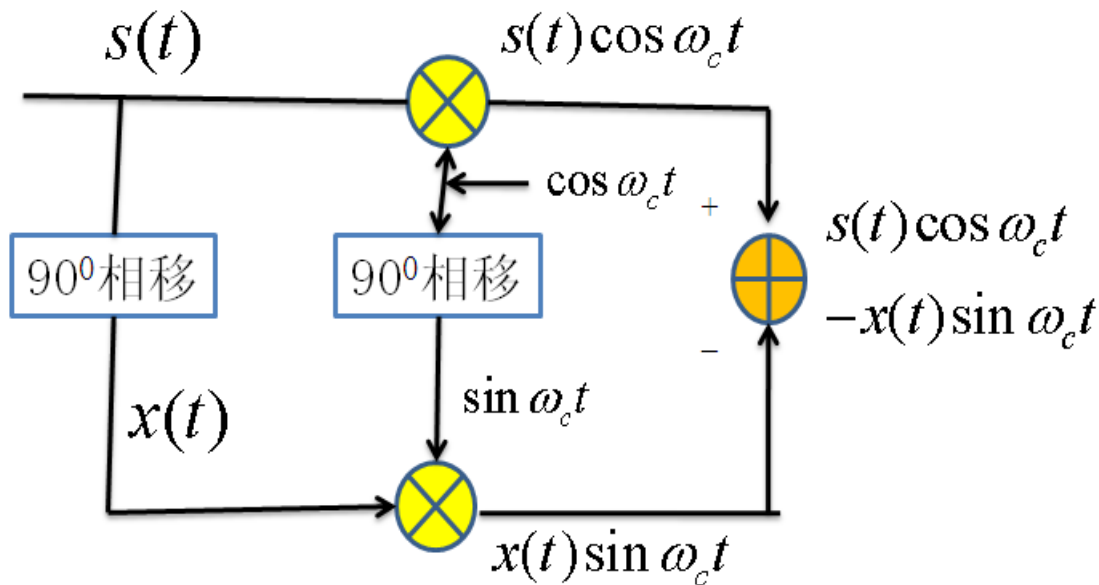
## 6.2 调幅电路



### 2. 移相法

$$u_{SSB} = s(t) \cos \omega_c t - x(t) \sin \omega_c t \text{ (余弦载波, 上边带)}$$

$$u_{SSB} = s(t) \sin \omega_c t + x(t) \cos \omega_c t \text{ (正弦载波, 上边带)}$$

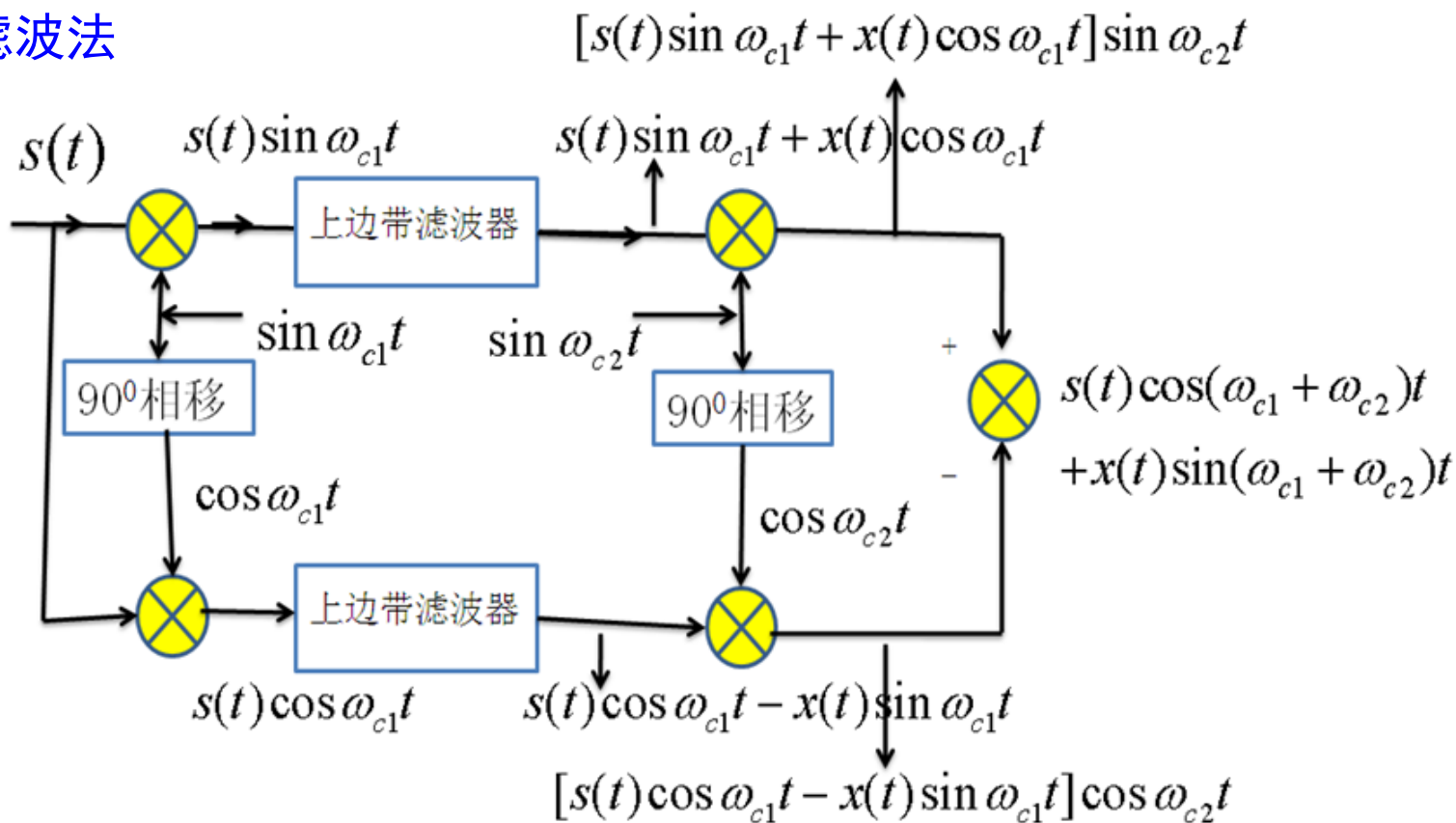


单一频率的移相器做起来简单, 困难在于对基带低频宽带信号中的各个频率成分都实现 $90^\circ$ 移相, 理论上可用Hilbert滤波器实现, 实际很难实现。

## 6.2 调幅电路



### 3. 移相滤波法



取  $\omega_{c1}$  较低，提高  $\delta$  降低对单边带滤波器的要求。

避免了简单移相法中对基带信号的移相，又吸收了多级滤波器的优点。

## 6.2 调幅电路



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

- 作业：6.2, 6.7, 6.12