



# 第六章

## 调制与解调





LOADING...



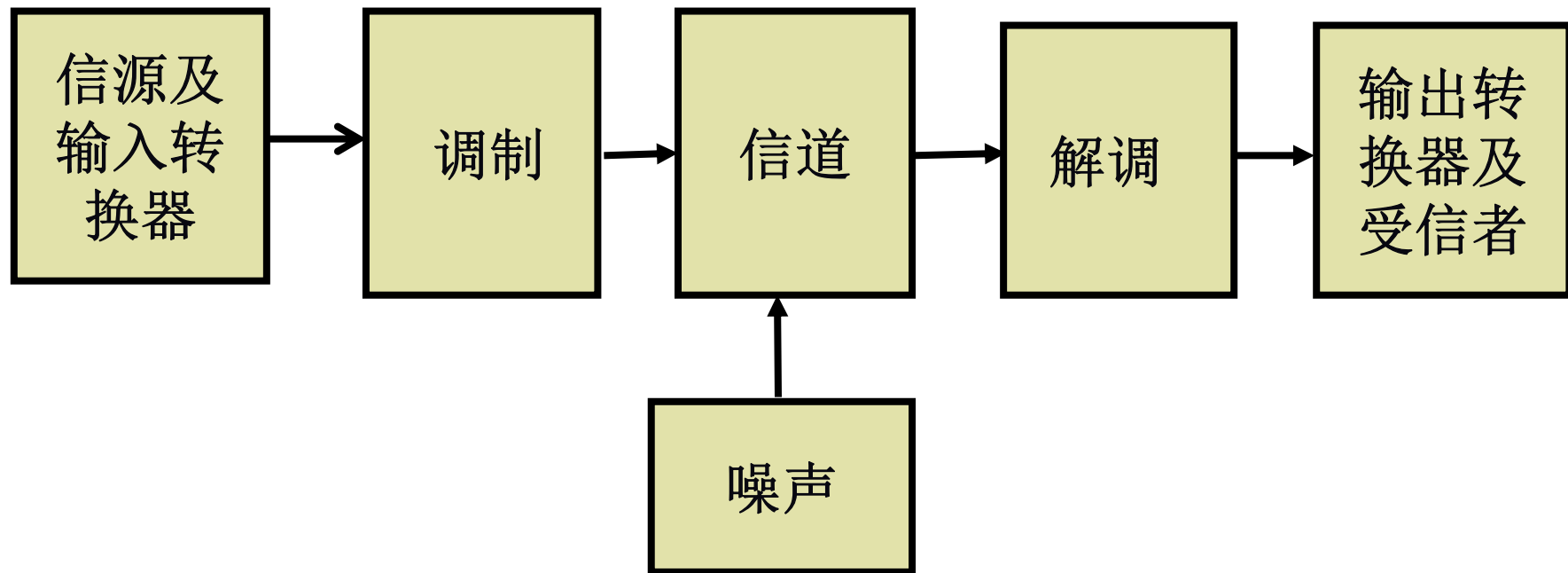
0



# 调制解调电路



## 调制解调器在通信系统中的位置



调制是将需要传输的信息编码和处理,使其适合传输的过程。  
一般的调制过程是指将基带信号搬移到更高的频带内。

# 为什么需要调制



- 基带信号一般不适合直接传输,需要将其移至适合在传输媒介传输和频带范围内;
- 提高频率利用效率;
- 利用较高的频带传输信号可有效降低接收和发送天线的尺寸(如语音信号不加以调制,其最小波长( $f=20\text{kHz}$ 时)为15km);
- 接收设备无法选出所需要电台的信号;



# 调制的基本概念



模拟调制：AM，FM，PM

数字调制：ASK，FSK，PSK

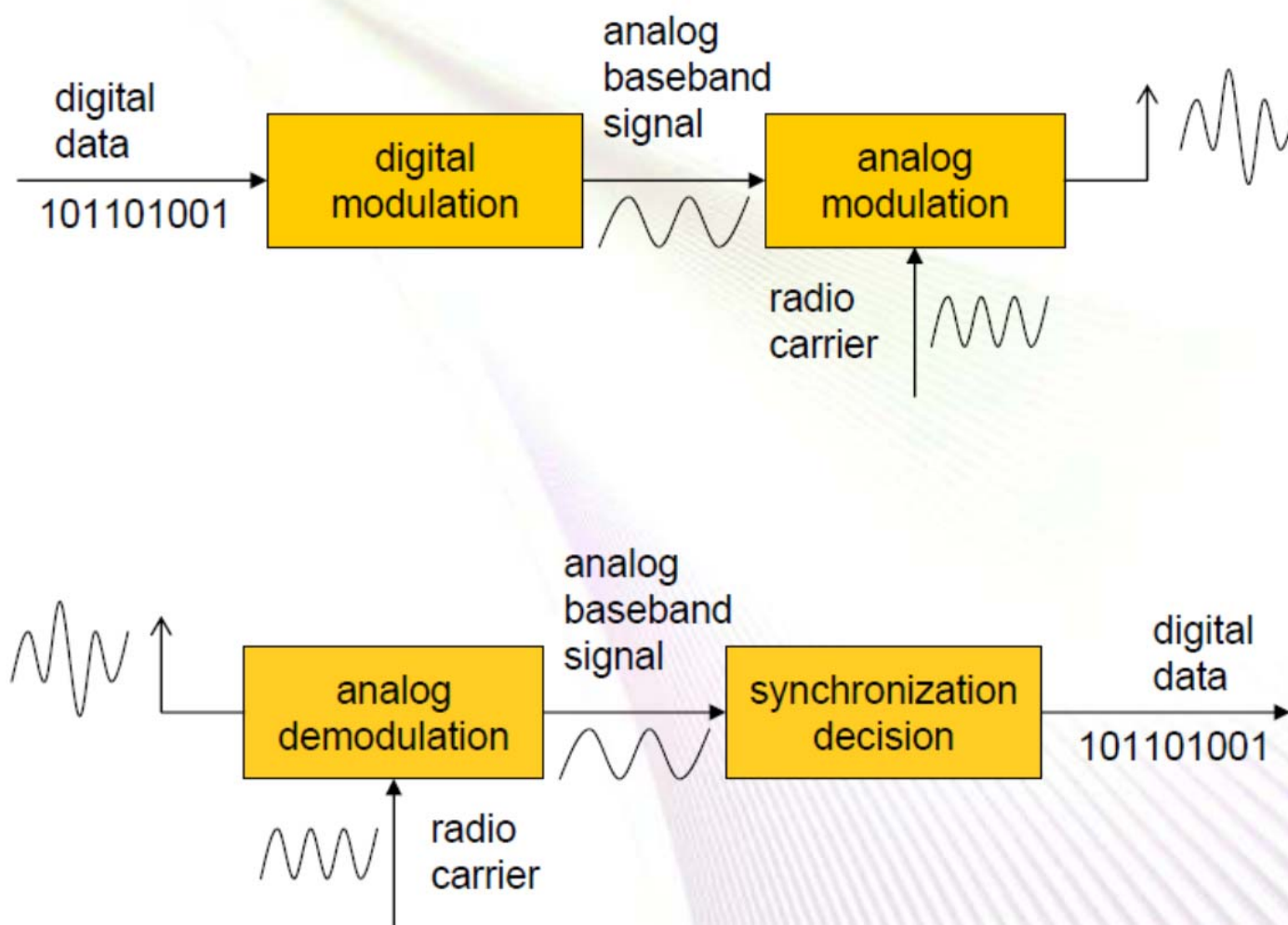
$$V(t) = A(t) \cos[2\pi f(t) + \varphi(t)]$$

AM  
ASK

FM  
FSK

PM  
PSK

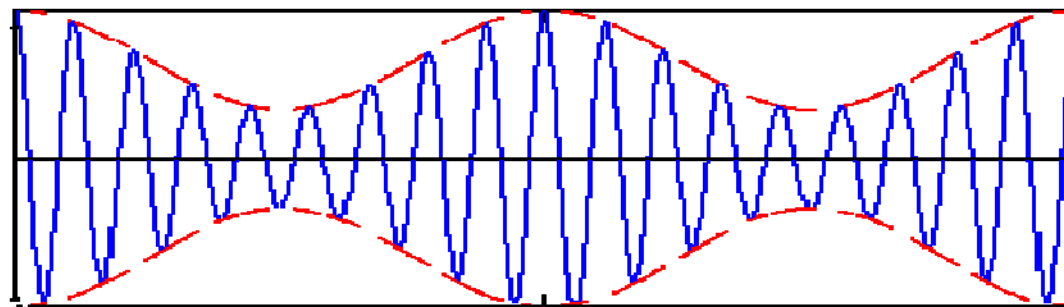




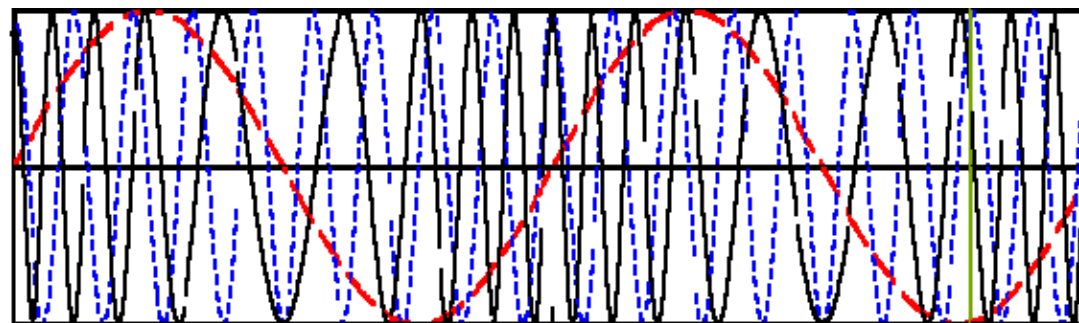
# 模拟调制



AM



FM



PM

其实也是频率调制,只是调制时对频率的控制精度更高,调制电路也较为复杂。

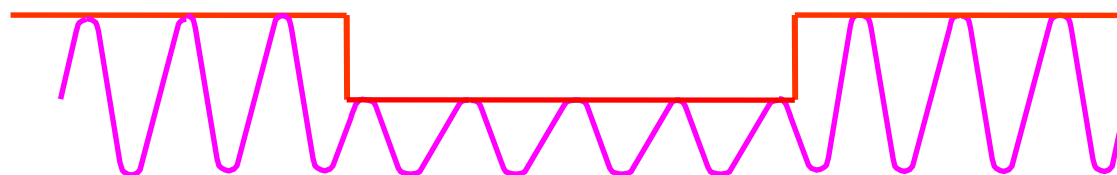


# 数字调制

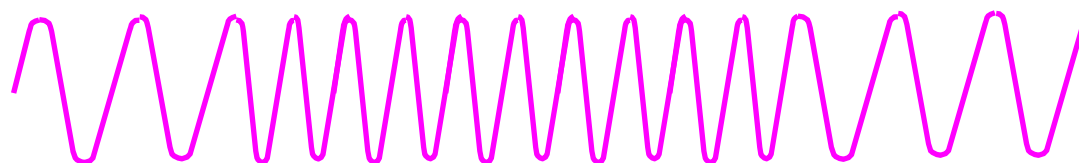


数字调制:

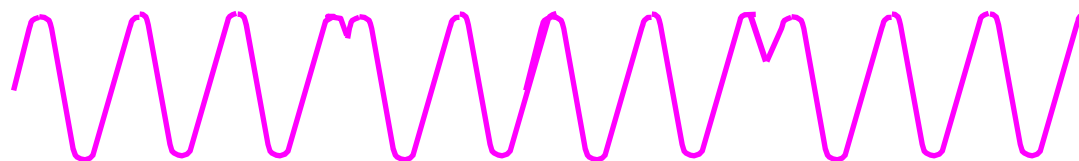
1. **ASK**



2. **FSK**



3. **PSK**





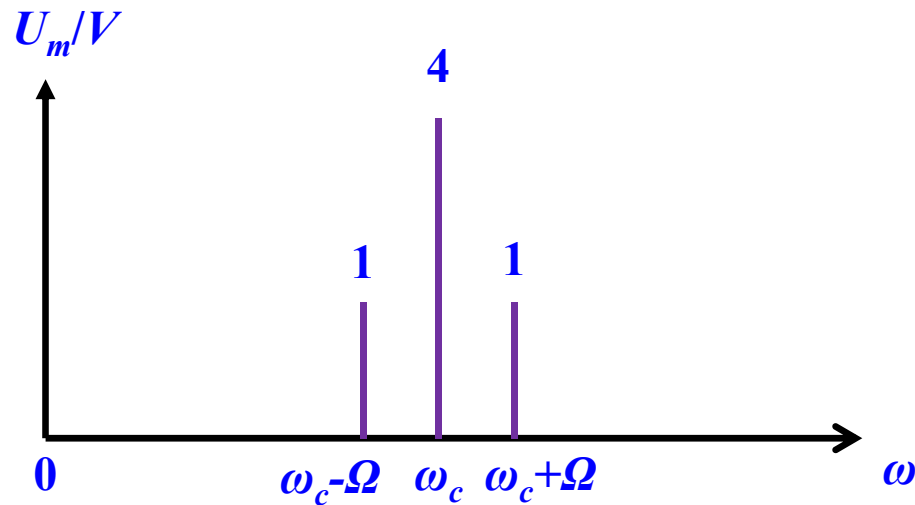


# 频谱的画法



$U(t)=4\cos\omega_c t + \cos(\omega_c-\Omega)t + \cos(\omega_c+\Omega)t$  画出其频谱图。

解：



# 振幅调制电路



标准调幅波信号的数学表示式

载频信号  $v_c(t) = V_{cm} \cos \omega_c t$

调制信号  $v_\Omega(t) = V_{\Omega m} \cos \Omega t$

AM波在单音调制时表达式

$$\begin{aligned} v_{AM}(t) &= V_m(t) \cos \omega_c t \\ &= (V_{cm} + K_A V_{\Omega m} \cos \Omega t) \cos \omega_c t \\ &= \underline{V_{cm} (1 + m_A \cos \Omega t) \cos \omega_c t} \\ &= \underline{V_{cm} \cos \omega_c t + m_A V_{cm} \cos \Omega t \cos \omega_c t} \end{aligned}$$

$$m_A = \frac{K_A V_{\Omega m}}{V_{cm}}$$

**调幅指数**， $K_A$ 为调制电路决定的比例常数，在幅度调制中，为保证不出现过调制，要求 $m_A \leq 1$

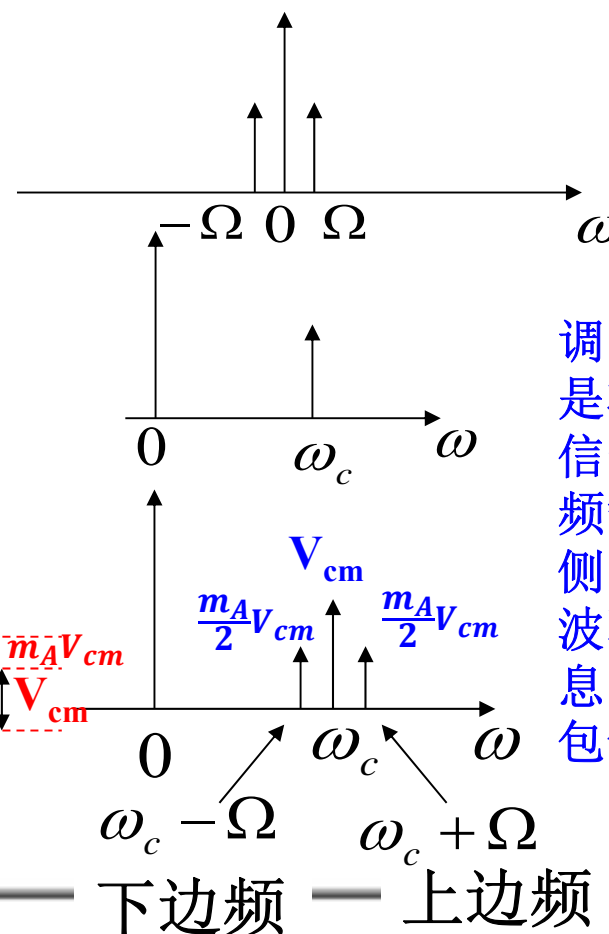
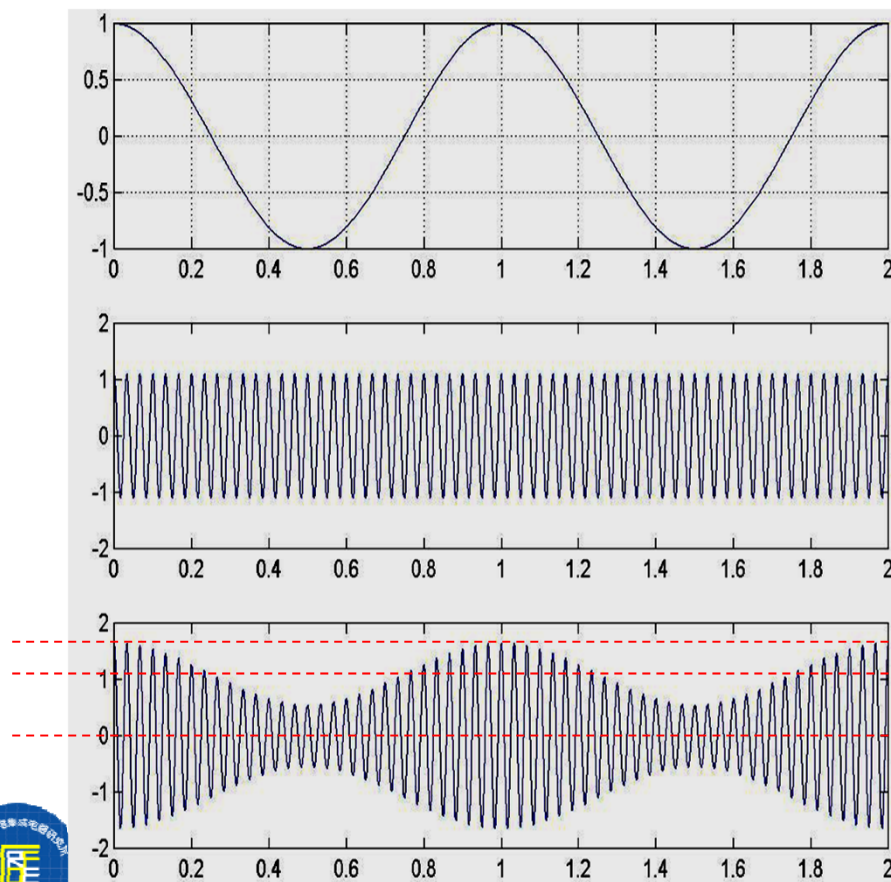


# 时域波形与频谱



单音调制AM波频谱表达式:

$$v_{AM}(t) = V_{cm} \cos \omega_c t + \frac{1}{2} m_A V_{cm} \cos(\omega_c + \Omega) t + \frac{1}{2} m_A V_{cm} \cos(\omega_c - \Omega) t$$



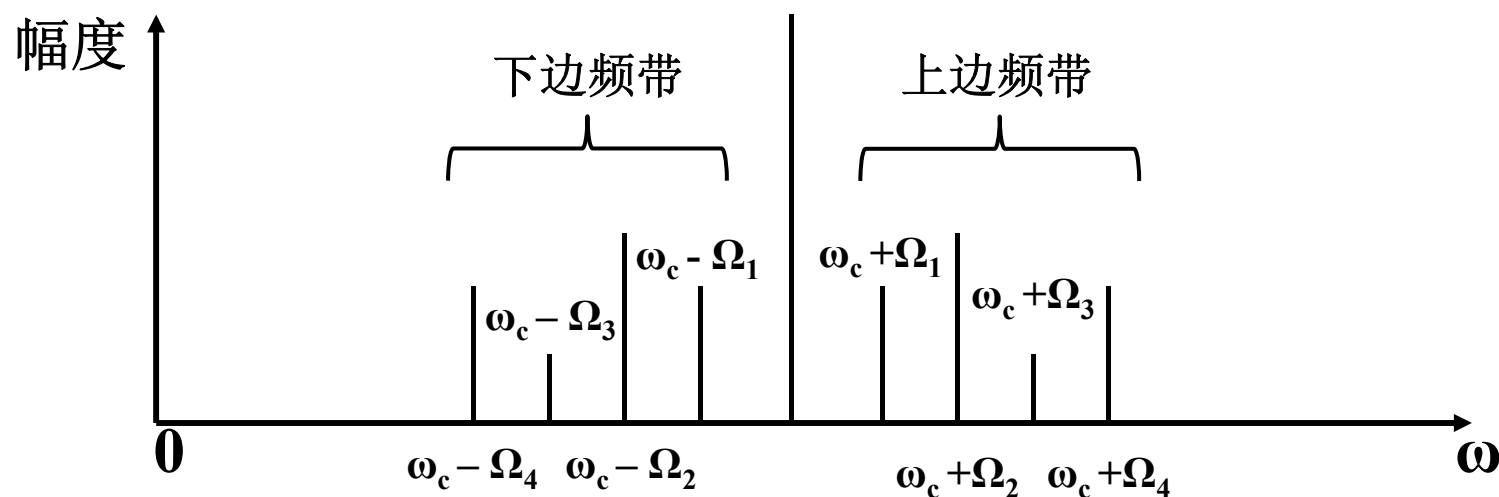
调幅的过程就是将低频调制信号搬移到高频载波分量两侧的过程。载波不含调制信息，只有边频包含调制信息。



# 结论



- AM波振幅变化规律;
- AM波所占据带宽



$$BW_{AM} = 2F_{\max} = \frac{2\Omega_{\max}}{2\pi}$$

- 幅度调制为线性调制。

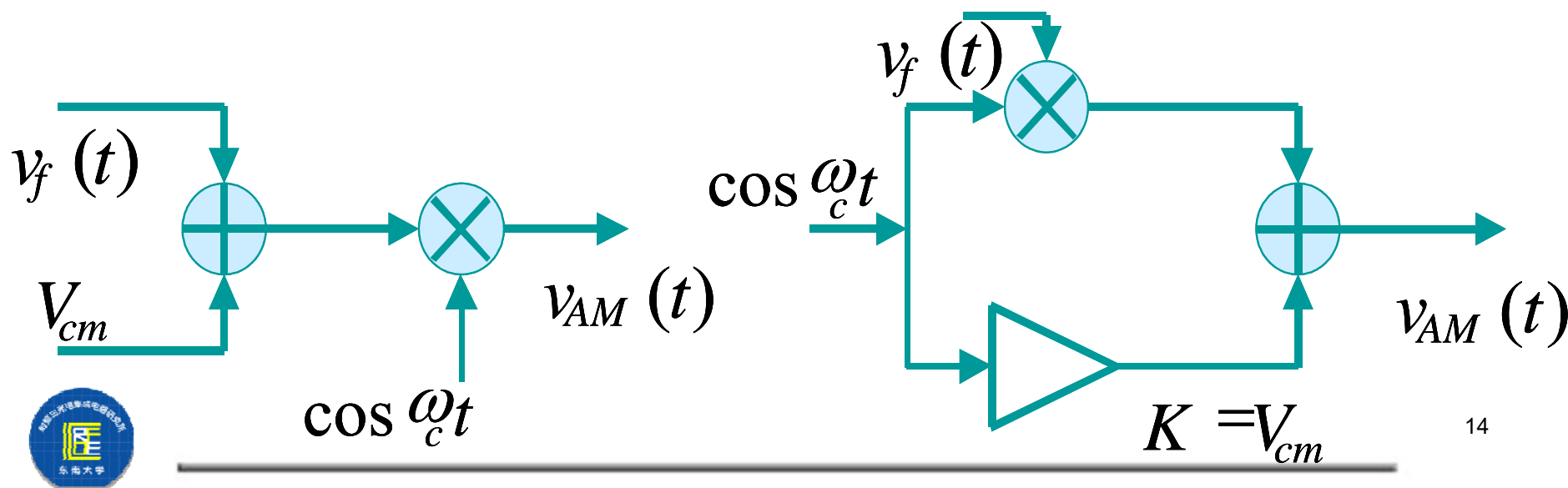


# AM调制电路组成模型



$$\begin{aligned} v_{AM}(t) &= (V_{cm} + K_A V_{\Omega m} \cos \Omega t) \cos \omega_c t \\ &= V_{cm} (1 + m_A \cos \Omega t) \cos \omega_c t \\ &= V_{cm} \cos \omega_c t + m_A V_{cm} \cos \Omega t \cos \omega_c t \end{aligned}$$

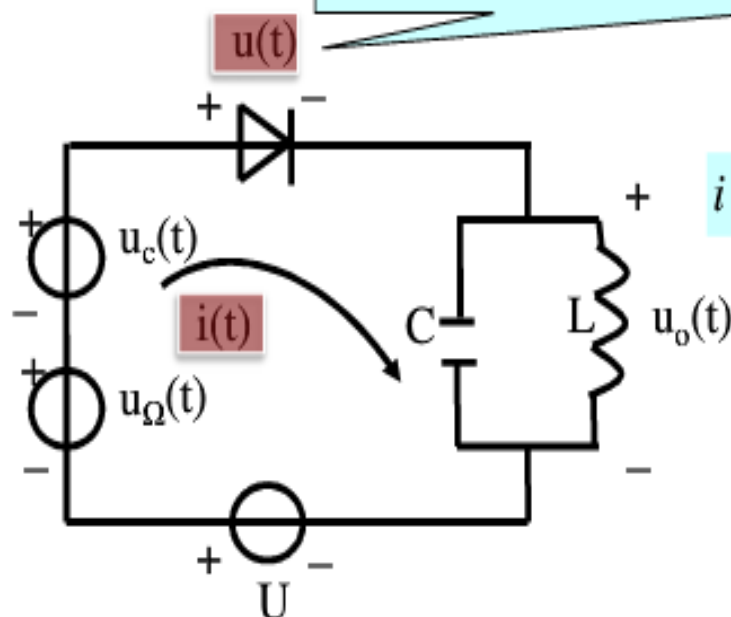
- 它是由载波和载波与调制信号相乘的两部分组成。
- 可以得到实现标准调幅的两种方案，如下图所示：



# 二极管实现普通调幅电路



$$u(t) = U + u_{\Omega}(t) + u_c(t) = U_Q + U_{\Omega m} \cos \Omega t + U_{cm} \cos \omega_c t$$



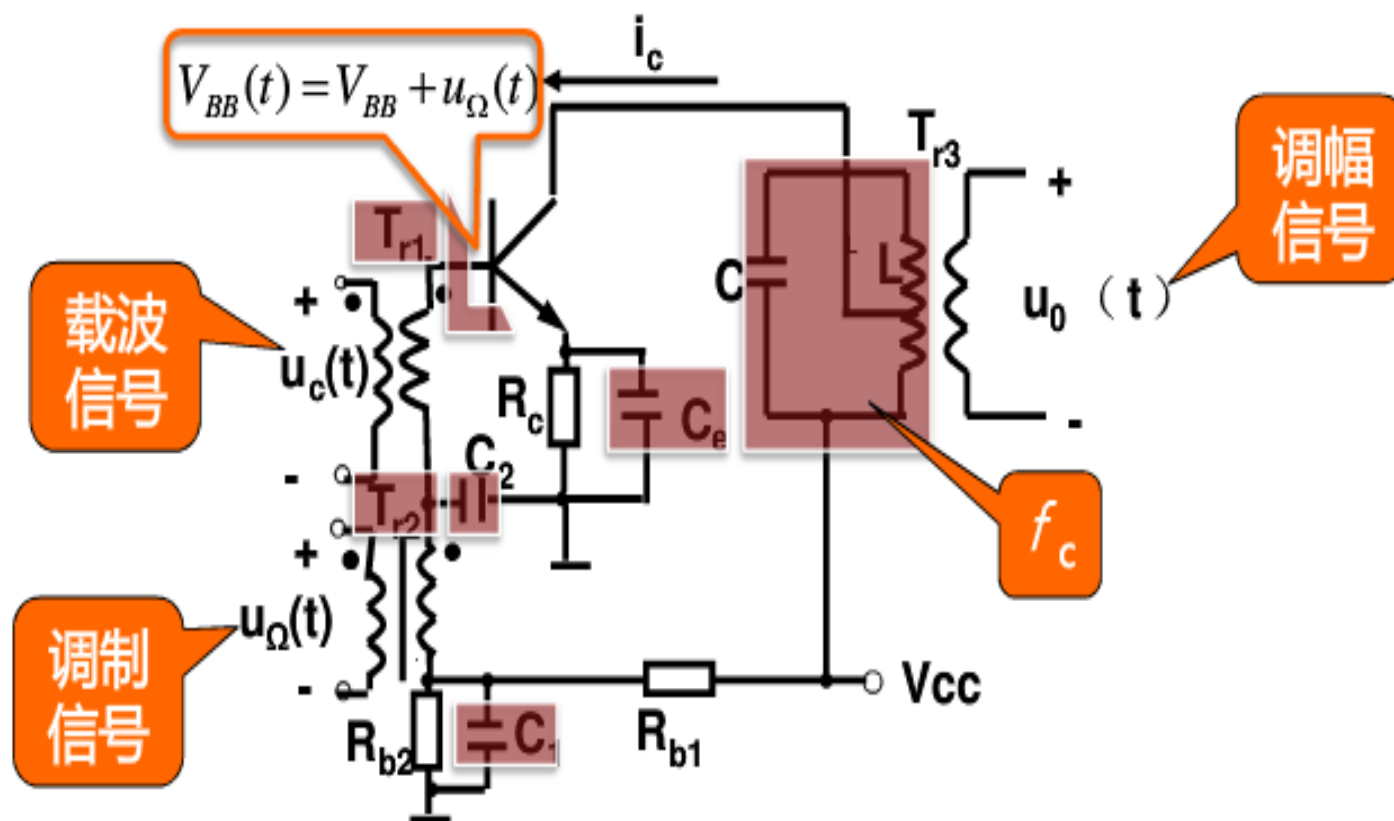
$$i = \alpha_0 + \alpha_1(u_1 + u_2) + \alpha_2(u_1 + u_2)^2 + \cdots + \alpha_n(u_1 + u_2)^n + \cdots$$

$u_c(t)$

$u_{\Omega}(t)$

$$i = f(u) = \alpha_0 + \alpha_1(U_{\Omega m} \cos \Omega t + U_{cm} \cos \omega_c t) + \alpha_2(U_{\Omega m} \cos \Omega t + U_{cm} \cos \omega_c t)^2 + \cdots$$

# 三极管实现普通调幅电路





# AM波的功率



若将调幅波电压加于负载电阻 $R_L$ 上，负载电阻吸收功率为各项正弦分量单独作用功率之和。

## ◆ 载波功率分量

$$P_c = \frac{1}{2} \frac{V_{cm}^2}{R_L}$$

## ◆ 上边频分量功率

$$P_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{m_A}{2} V_{CM} \right)^2 \frac{1}{R_L} = \frac{1}{8} \frac{m_A^2 V_{CM}^2}{R_L} = \frac{1}{4} m_A^2 P_C$$

## ◆ 下边频分量功率

$$P_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{m_A}{2} V_{CM} \right)^2 \frac{1}{R_L} = \frac{1}{8} \frac{m_A^2 V_{CM}^2}{R_L} = \frac{1}{4} m_A^2 P_C$$





◆ 调制信号在一个周期内的平均功率

$$P = P_c + P_1 + P_2 = \left(1 + \frac{m_A^2}{2}\right) P_c$$

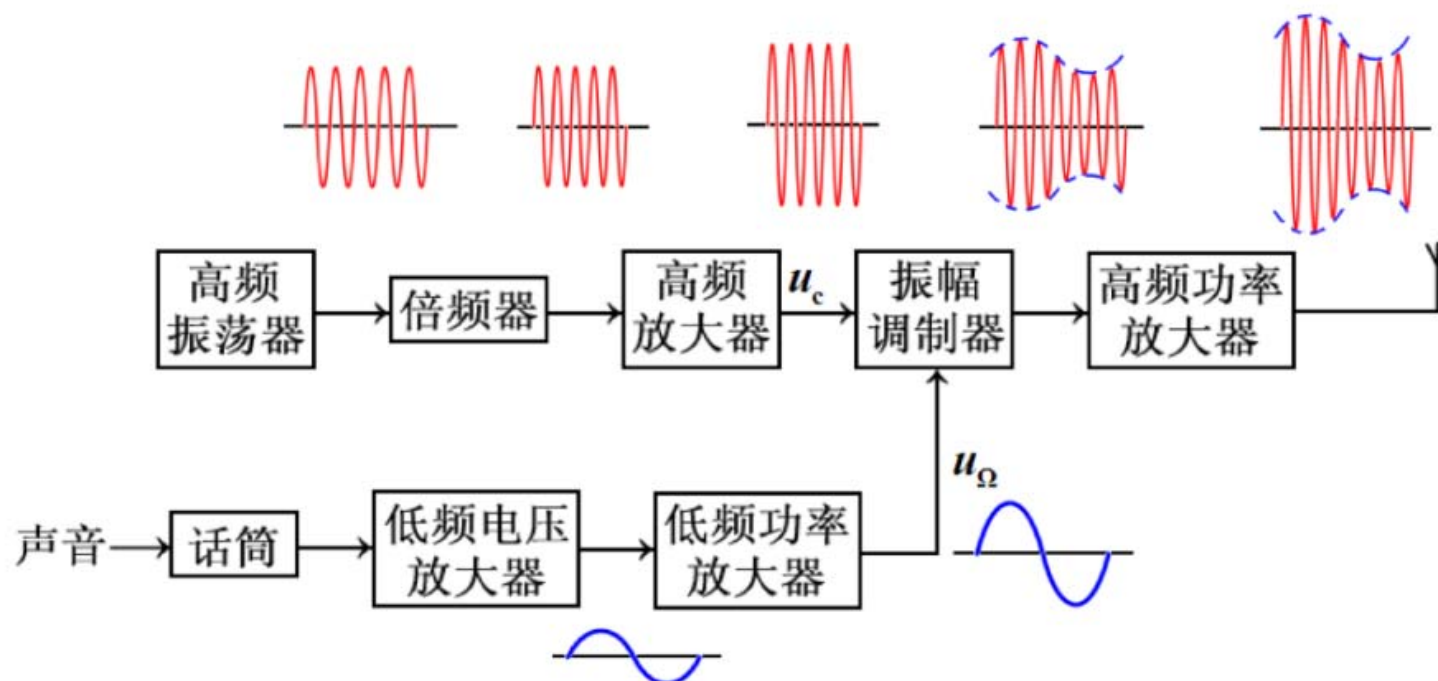
可见，边频功率随着 $m_A$ 的增大而增大，当 $m_A=1$ 时，边频功率最大，即 $P = \frac{3}{2}P_c$ 这时上、下边频功率之和只占载波功率的一半。这种调制方式，发射端发送的功率被不携带信息的载波占了很大的比例。

➤ 改进型的AM，DSB和SSB





# 调幅广播发射机的组成框图



# 例题



若模拟调幅波(AM)的表达式为 $V_{AM}(t)=10(1+0.7\cos \Omega t)\cos \omega_c t$ ,  
其中载频 $\omega_c=(2000*2\pi)\text{kHz}$ , 调制频率 $\Omega=(2\pi)\text{kHz}$ 。(1) 试画出该调幅波频谱图; (2), 并计算它在负载 $R=1\Omega$ 时的载波功率; 平均功率及有效频带宽度。

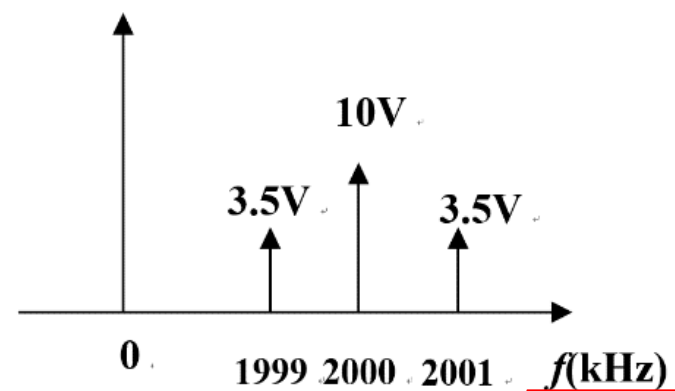
解: (1)  $f_c=2000\text{kHz}$ , 调制频率 $\Omega=1\text{kHz}$ ,

$$(2) P_c = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{CM}^2}{R} = \frac{1}{2} \times 10^2 = 50(W)$$

$$P_{\text{边}} = \frac{1}{2} m_a^2 P_c = \frac{1}{2} \times 0.7^2 \times 50 = 12.25(W)$$

$$P = P_c + P_{\text{边}} = 62.25W$$

$$B = 2\Omega = 2\text{kHz}$$





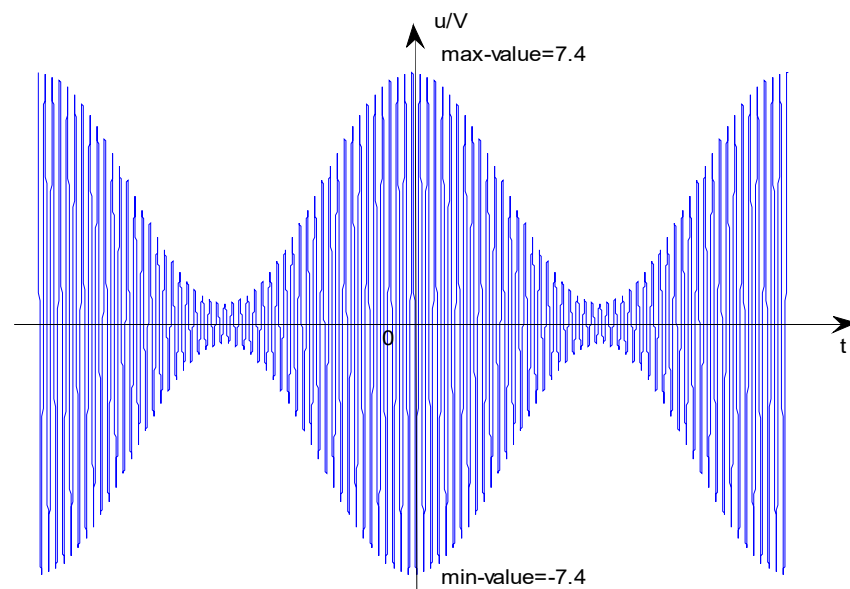
例：一调幅波为

$$u_{\text{AM}}(t) = 4[1 + 0.85 \cos 2\pi \times 3 \times 10^3 t] \cos(2\pi \times 10^7 t)$$

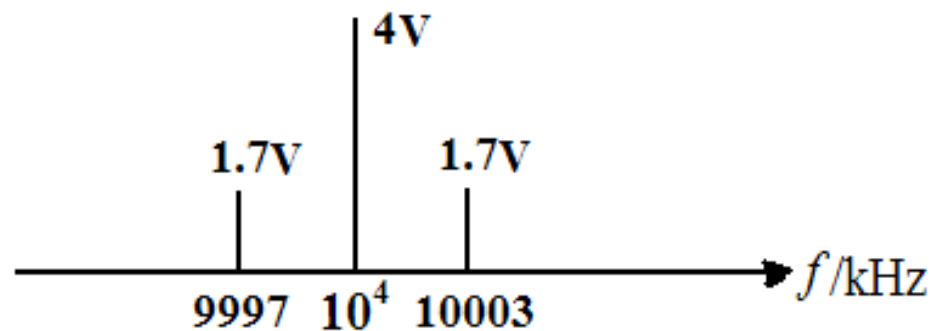
- (1) 画出调幅波的波形，标出峰与谷值；
- (2) 画出调幅波的频谱图，并表明参数；
- (3) 计算该信号占的带宽；
- (4) 算该信号在单位电阻上消耗的边带功率与总平均功率的比值。



解：（1）波峰值7.4V，波谷值-7.4V。



（2）调幅波的频谱图：





$$(3) \quad BW_{AM} = 2 \times F = 2 \times 3 \times 10^3 = 6 \times 10^3 \text{ Hz}$$

$$(4) \quad P_{\text{载}} = \frac{4^2}{2} = 8 \text{ W}$$

$$P_{\text{DSB}} = 2 \cdot \frac{1.7^2}{2} = 2.89 \text{ W}$$

$$\frac{P_{\text{DSB}}}{P_{\text{AM}}} = \frac{P_{\text{DSB}}}{P_{\text{载}} + P_{\text{DSB}}} = \frac{2.89}{8 + 2.89} = 26.5\%$$



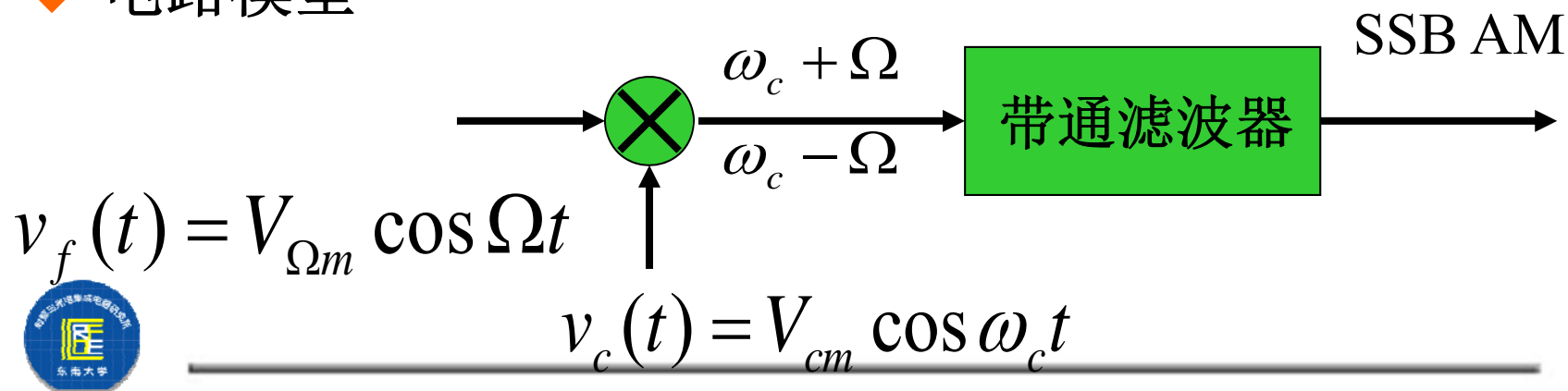
# SSB调幅的模型和电路



- SSB已调波的特点
  - ◆ SSB大大节省能量。
  - ◆ SSB增加可容纳频道数。
  - ◆ SSB不含载频，边带内频率衰落失真小。
  - ◆ 解调时要求接收端能产生或恢复载频。
- SSB调幅电路模型

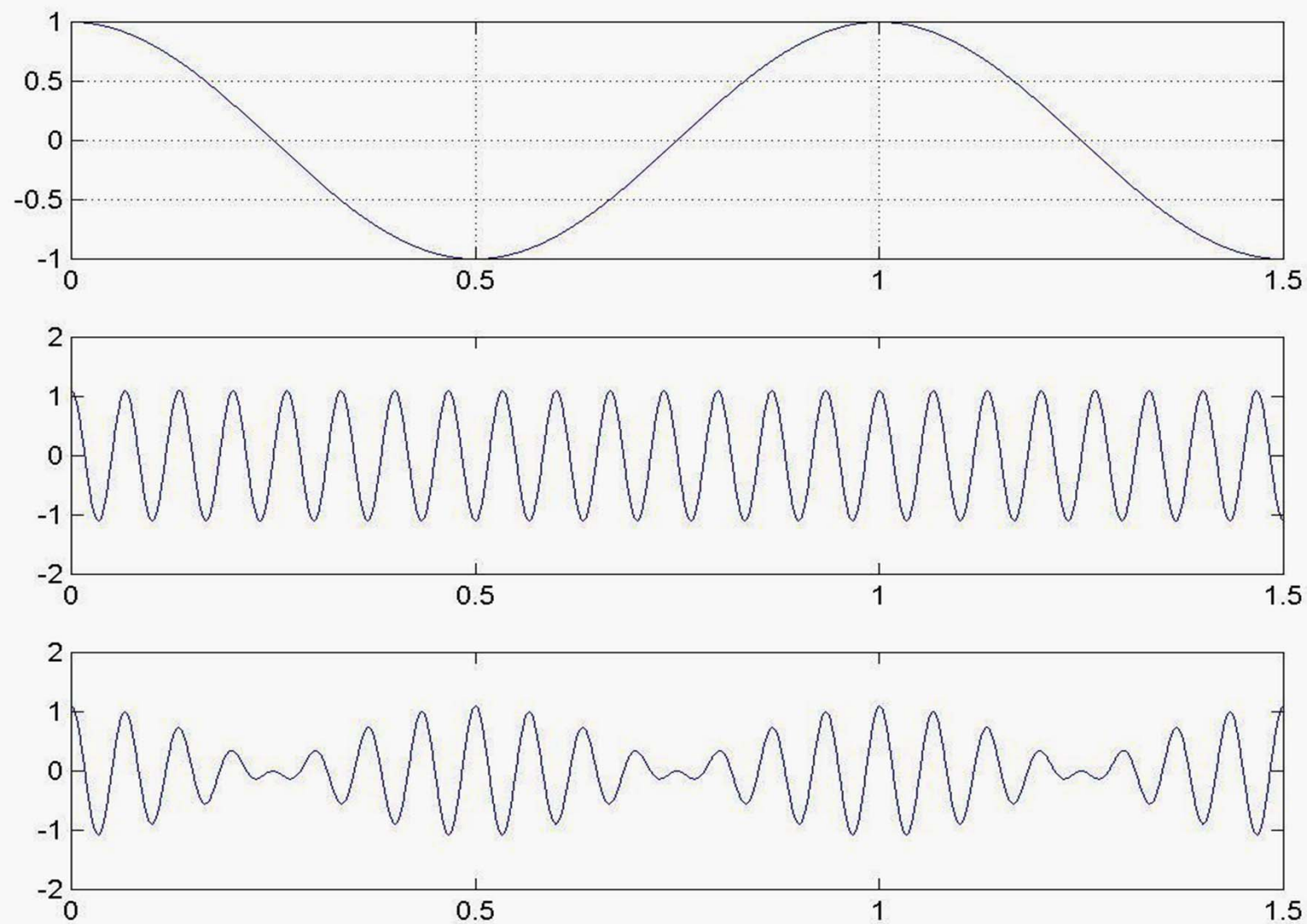
## 一、相乘滤波法

### ◆ 电路模型

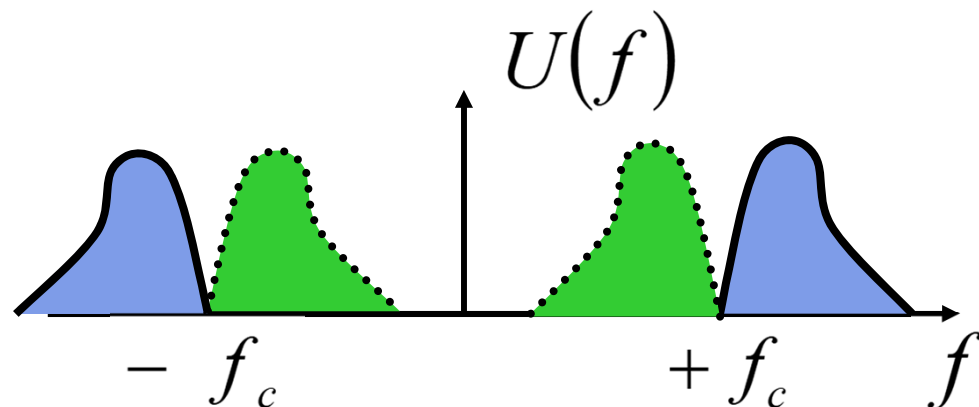




# 抑制载波调幅信号的波形图

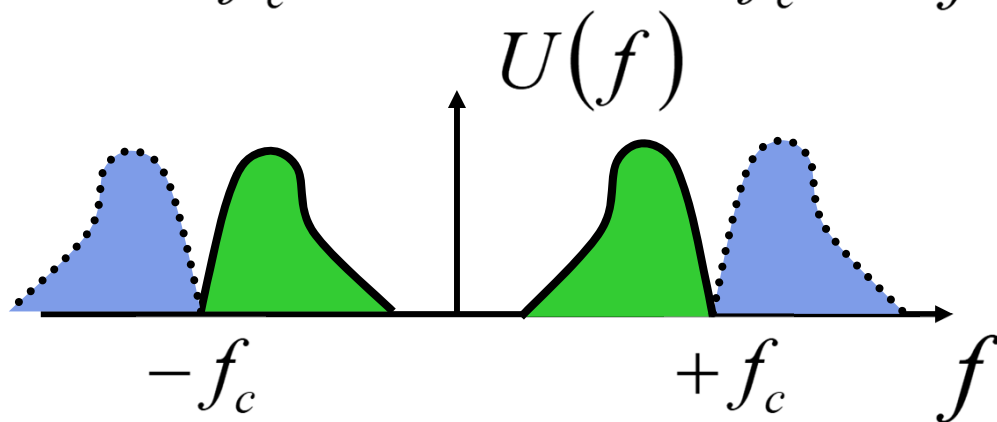


# 实现SSB的频谱图



$$H(f) = \begin{cases} 1 & |f| \geq f_c \\ 0 & |f| < f_c \end{cases}$$

(保留上边带)



$$H(f) = \begin{cases} 1 & |f| \leq f_c \\ 0 & |f| > f_c \end{cases}$$

(保留下边带)

## ◆ 实现的技术难度

对边带滤波器带外衰减陡降特性要求极高。

# 调幅电路的分类



	优点	缺点	应用
普通调幅 (AM)	发射机简单，成本低	发射机效率很低，能量浪费大，频带较宽	中、短波无线电广播系统
双边带调幅 (DSB)	发射机效率高	发射机比较复杂，且频带较宽	实际应用很少
单边带调幅 (SSB)	发射机效率最高，频带节约一半	发射机复杂	短波无线电通信应用广泛

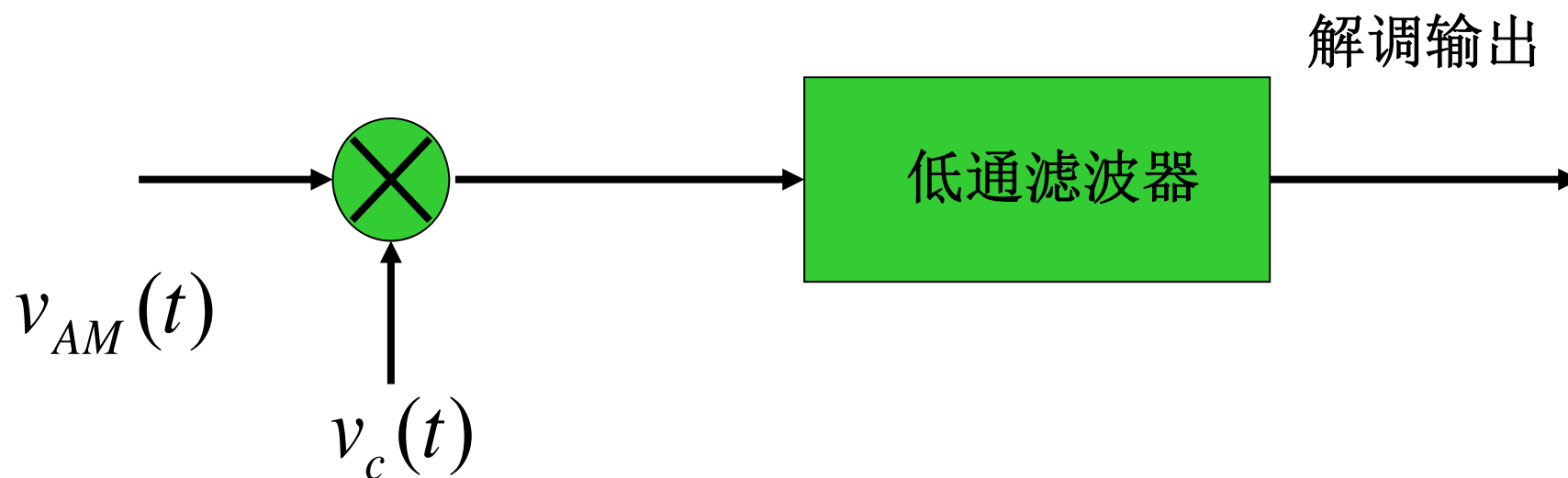
# 标准调幅信号 (AM) 的解调



AM信号的解调方法可分为相干与非相干解调。

## 1) 相干解调

它是将调幅信号与一本本地载波信号相乘, 从而恢复出调制信号。





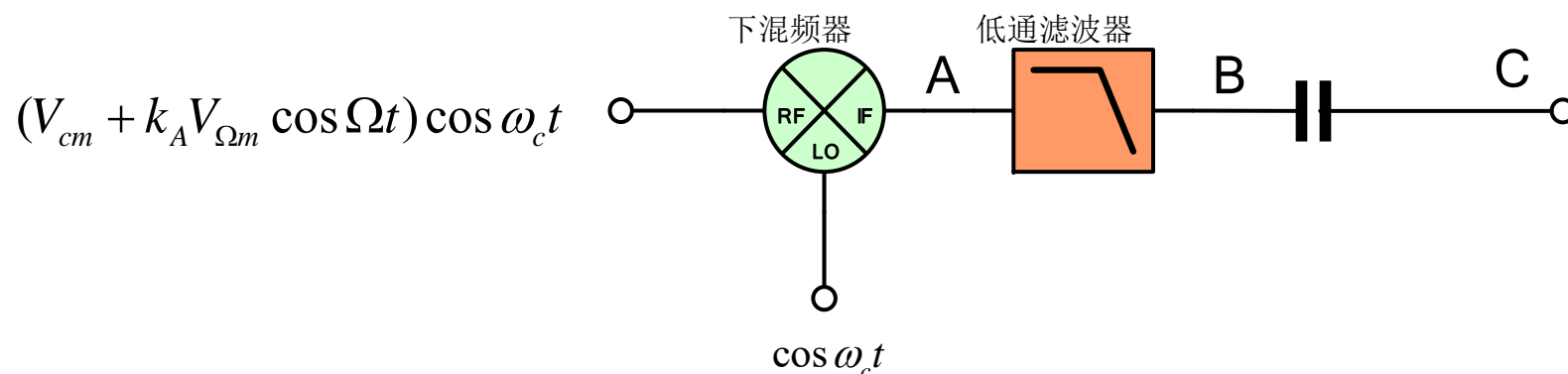
## AM相干解调小结

- 产生本地载波是相干解调的一个关键;
- 对于**AM**信号, 可以用窄带滤波器直接从调幅信号中提取;
- 对载波同步要求高, 因而应用较少;





一信号为 $(V_{cm} + k_A V_{\Omega m} t) \cos \omega_c t$ ，另一信号为 $\cos \omega_c t$ ，经过如下图所示的系统，1) 试推导输出波形表达式；2) 画出A点和C点的频谱；3) 说明该电路完成何种功能？



$$\begin{aligned} 1) \quad v_{AM}(t) \cdot \cos \omega_c(t) &= (V_{cm} + K_A V_{\Omega m} \cos \Omega t) \cos \omega_c t \cdot \cos \omega_c t \\ &= V_{cm} (1 + m_A \cos \Omega t) \cos \omega_c t \cdot \cos \omega_c t \\ &= V_{cm} \cos \omega_c t \cdot \cos \omega_c t + m_A V_{cm} \cos \Omega t \cos \omega_c t \cdot \cos \omega_c t \end{aligned}$$

该信号经低通滤波器后输出为，即A点：

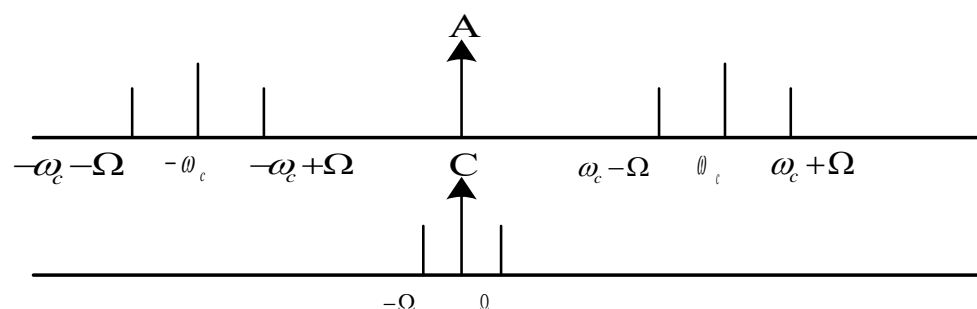
$$\frac{1}{2} V_{cm} + \frac{1}{2} m_A V_{cm} \cos \Omega t$$



经过隔直电容C后输出为，即B点：

$$\frac{1}{2} m_A V_{cm} \cos \Omega t$$

频谱图如下：



输入信号为AM已调波和其载波，该电路完成了AM波的同步检波即为相干解调。



## (2) 非相干解调

非相干解调不需要本地载波作为相干信号，所以称为非相干解调。

工作原理：利用某些元件的非线性特性对AM信号进行非线性变换。

- 非相干解调的基本方法
  - a) 小信号平方律解调
  - b) 平均包络解调
  - c) 大信号峰值检波

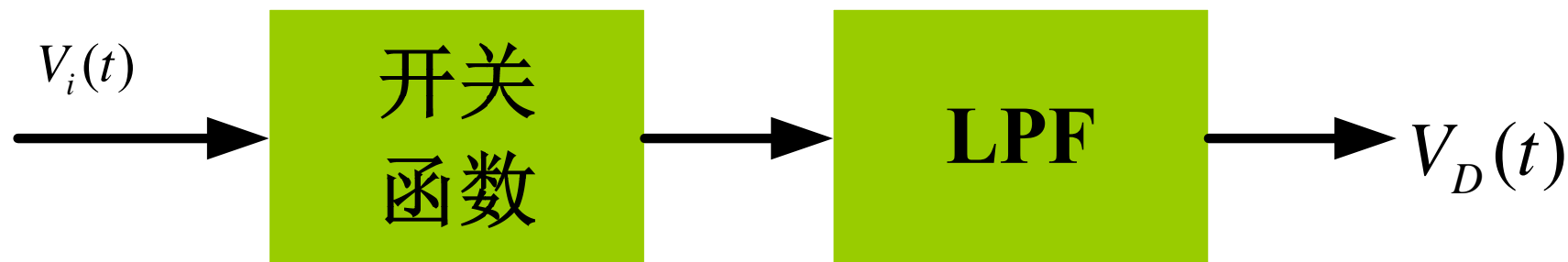






# AM平均包络检波

- 原理：利用开关函数与AM波相乘滤波方法。
- 电路结构



- 小结
- 载波信号与调制信号频率关系。
- 利用载波信号与AM信号相乘。

# AM 振幅解调电路包络检波电路



## 包络检波电路（大信号峰值包络解调器）

### ● 电路特点：

- 二极管无偏置电压。
- 输入信号  $v_i(t)$  大。
- 二极管电流流通角很小。
- 元件参数满足下列条件：

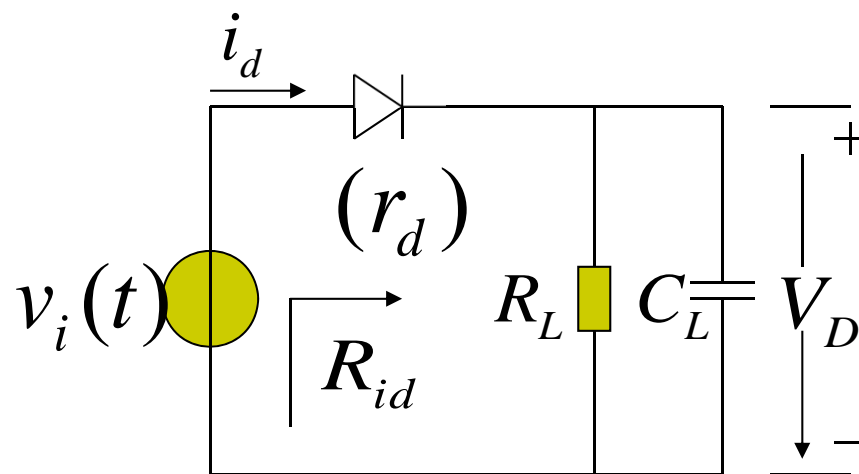
$$R_L C_L \gg r_d C_L$$

$$R_L C_L \gg T_i$$

$$R_L C_L < T_\Omega$$

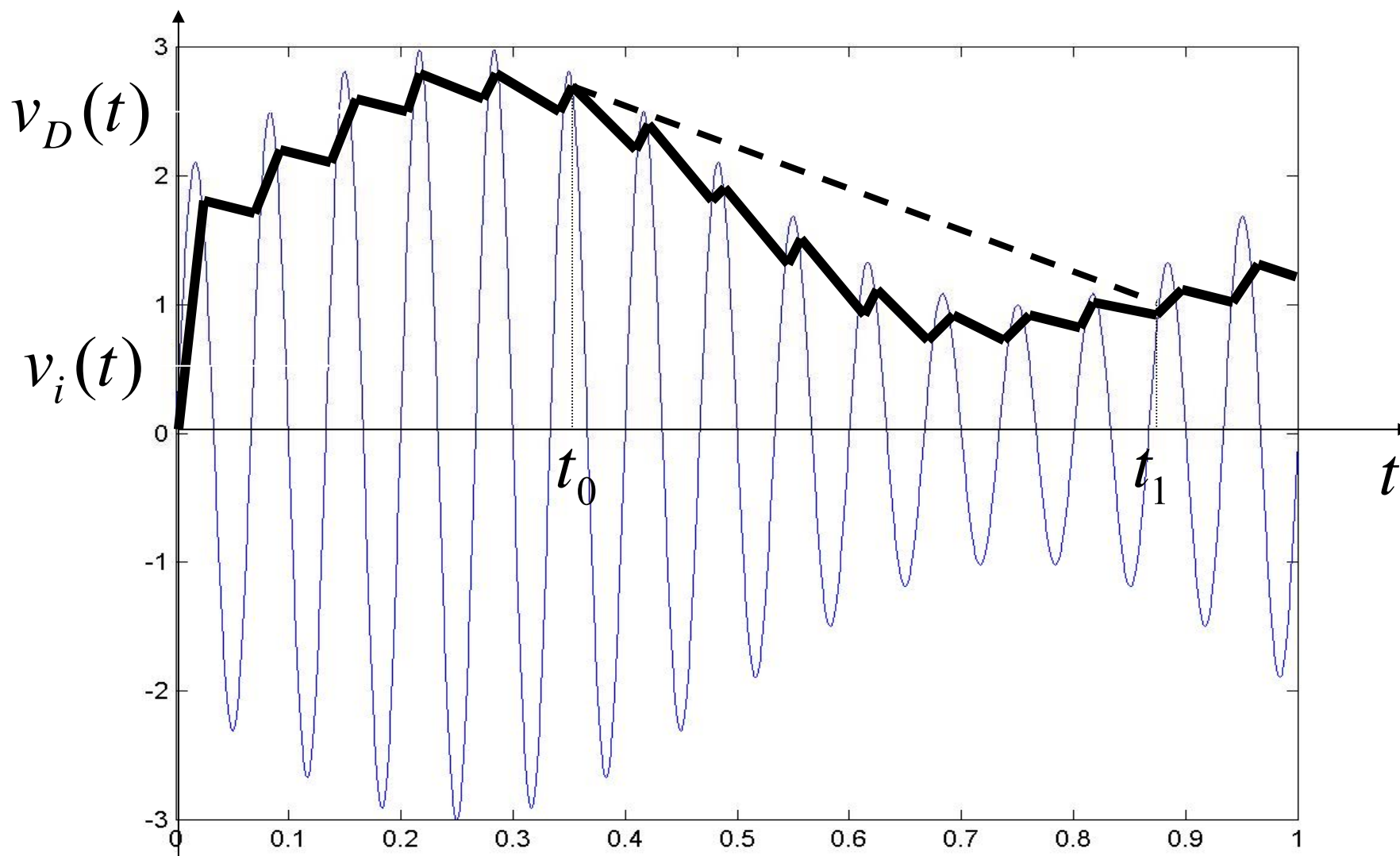
$T_i$  载波信号周期

$T_\Omega$  调制信号周期



## 2、大信号峰值包络解调器（续2）

电路的工作过程： $R_L C_L$  电路充放电。



# SSB的解调原理



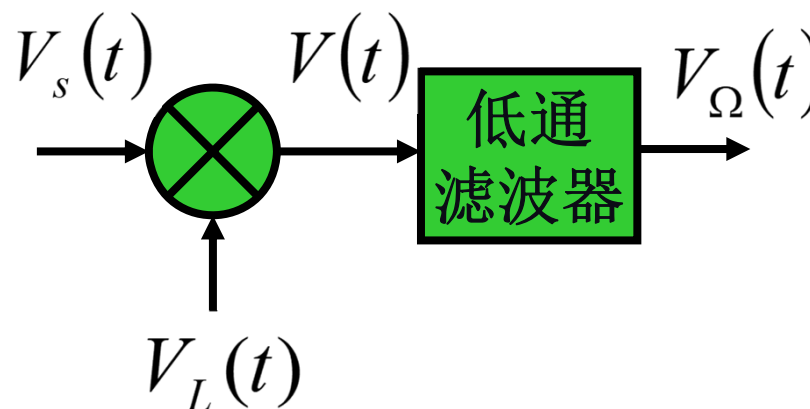
- SSB 信号包络不反映原调制信号规律，不能用包络检波解调。
- 同步检波原理
- ◆ 电路模型与频谱

SSB信号为单音调制：

$$V_s(t) = V_{sm} \cos[(\omega_c + \Omega)t + \theta_s]$$

同步检波时要求：

$$V_L(t) = V_{Lm} \cos(\omega_L t + \theta_L)$$



恢复或产生的载频为：  $\omega_L = \omega_C, \theta_L = \theta_S$





◆ 同频检波输出为:

$$\begin{aligned} V(t) &= A_M V_s(t) \cdot V_L(t) \\ &= \frac{1}{2} A_M V_{sm} V_{Lm} \{ \cos \Omega t + \cos[(2\omega_c t + \Omega)t + 2\theta_s] \} \end{aligned}$$

◆ 由低通滤波器后得解调输出:

$$V_{\Omega}(t) = \frac{1}{2} A_M A_F V_{sm} V_{Lm} \cos \Omega t = V_{\Omega m} \cos \Omega t$$

特点

- ◆ **SSB**解调仍是一种频谱搬移。
- ◆ 解调模型仍是相乘电路+低通滤波器。
- ◆ **SSB**解调时, 接收载频必须与发射载频同频同相, 否则会失真。



# FM和PM调制的基本概念

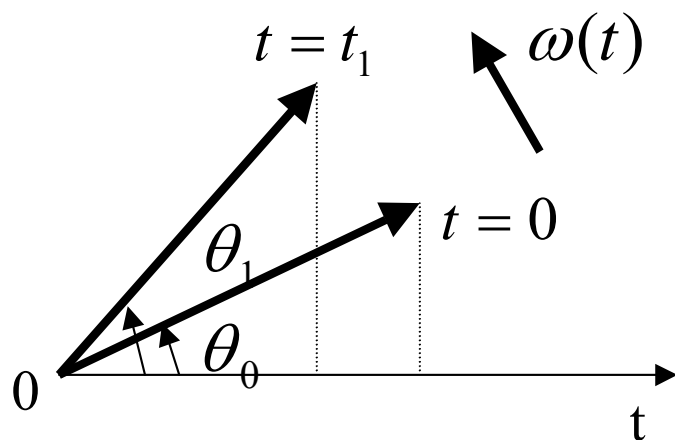


## 瞬时频率和瞬时相位

一个余弦信号可以表示为： $v_c(t) = V_{cm} \cos \phi(t)$

其中， $\phi(t) = \omega_c t + \theta_0$  称为该余弦信号的**全相角**。

（角频率是常数）可以用旋转矢量在横轴上的投影表示。



- **瞬时角频率**  $\omega(t)$ : 称在某一时刻的角频率为该时刻的瞬时角频率。

- **瞬时相位**  $\phi(t)$ : 称在某一时刻的全相角为该时刻的瞬时相位。

- $t = 0$  时的初始相位为  $\theta_0$

$$\omega(t) = \frac{d\phi(t)}{dt}$$

$$v_c(t) = V_{cm} \cos\left[\int \omega(t) dt + \theta_0\right]$$





- 在频率调制时，是使余弦信号的瞬时角频率与调制信号成线性关系变化，而初始相位不变。

- **FM波和PM波的表达式**

- **FM:** 用基带调制信号改变载波角频率

- 载波瞬时角频率为:  $\omega(t) = \omega_c + k_f v_{\Omega}(t)$

- 已调瞬时相角:

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt = \omega_c t + k_f \int_0^t v_{\Omega}(t) dt + \theta_0$$

**FM已调波表达式:**

$$v_{FM}(t) = V_{om} \cos\left[\omega_c t + k_f \int_0^t v_{\Omega}(t) dt + \theta_0\right]$$





- **PM波**：用基带调制信号改变载波相角

$$\theta(t) = \omega_c t + k_p v_\Omega(t) + \theta_0$$

**PM已调波表达式**

$$v_{PM}(t) = V_{om} \cos[\omega_c t + k_p v_\Omega(t) + \theta_0]$$

对于单音调制： $v_\Omega(t) = V_{\Omega m} \cos \Omega t$

- **FM已调波表达式**

$$v_{FM}(t) = V_{om} \cos(\omega_c t + M_f \sin \Omega t + \theta_0)$$

- **PM已调波表达式**

$$v_{PM}(t) = V_{om} \cos(\omega_c t + M_p \cos \Omega t + \theta_0)$$

$$M_f = \frac{k_f V_{\Omega m}}{\Omega} = \frac{\Delta \omega_m}{\Omega} = \frac{\Delta f_m}{F}$$

调频指数

$$M_p = k_p V_{\Omega m}$$

调相指数



# 调频波和调相波的主要参数



	频率调制	相位调制
瞬时角频率	$\omega_F(t) = \omega_c + K_F v_f(t)$	$\omega_p(t) = \omega_c + K_P dv_f(t)/dt$
附加相位	$\theta_F(t) = K_F \int_0^t v_f(\lambda) d\lambda$	$\theta_P(t) = K_P v_f(t)$
全相角	$\phi_F(t) = \omega_c t + K_F \int_0^t v_f(\lambda) d\lambda + \theta_0$	$\phi_P(t) = \omega_c t + K_P v_f(t) + \theta_0$
已调信号	$v_{FM}(t) = V_{cm} \cos[\phi_F(t)]$	$v_{PM}(t) = V_{cm} \cos[\phi_P(t)]$

## 最大调制角频偏

**FM**  $\Delta\omega_m = k_f V_{\Omega m}$

**PM**  $\Delta\omega_m = k_p V_{\Omega m} \Omega = M_p \Omega$



- 调角波的有效带宽
- ◆ 调角波的有效带宽  $BW_{CR}$  可用 FM 波各频谱分量平均值的 98% 所占据的频谱宽度来估算

宽带调频:

$$BW_{CR} = 2(M_f + 1)F = 2(\Delta f_m + F)$$

窄带调频:

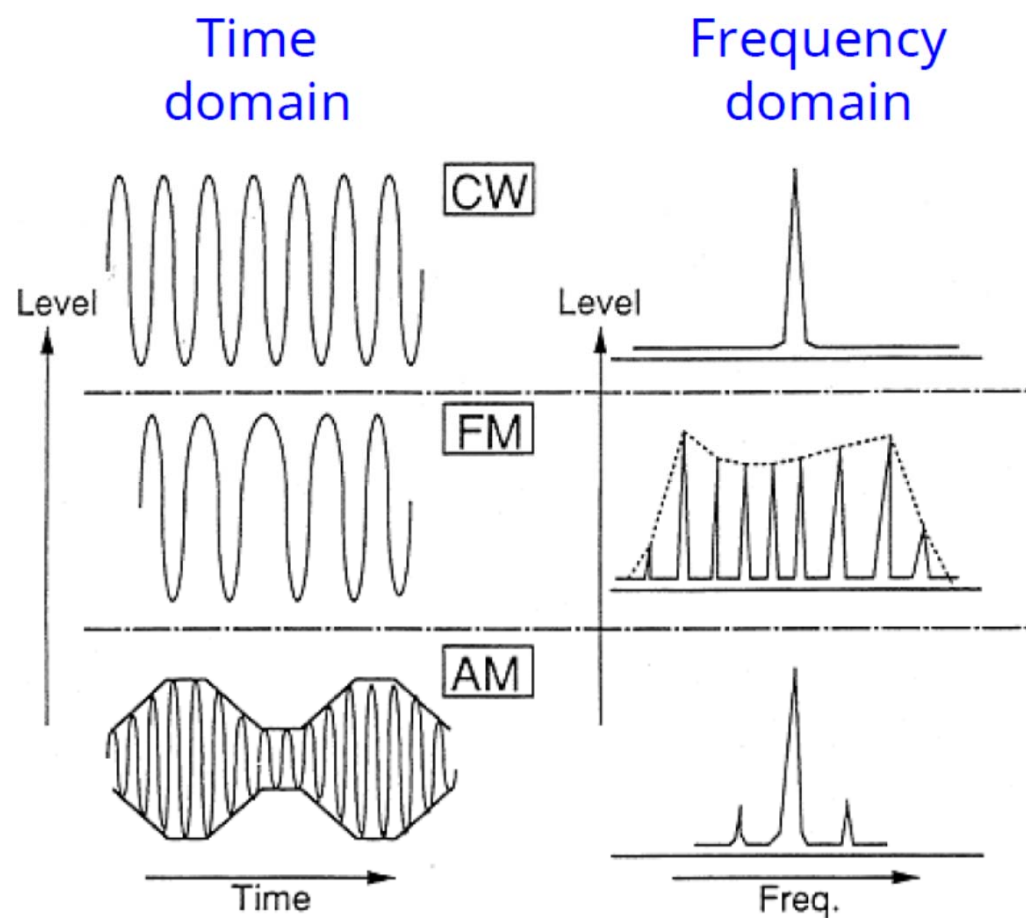
$$\Delta f_m \gg F, M_f \gg 1, BW_{CR} \approx 2\Delta f_m$$

$$\Delta f_m \ll F, M_f \ll 1, BW_{CR} \approx 2F$$

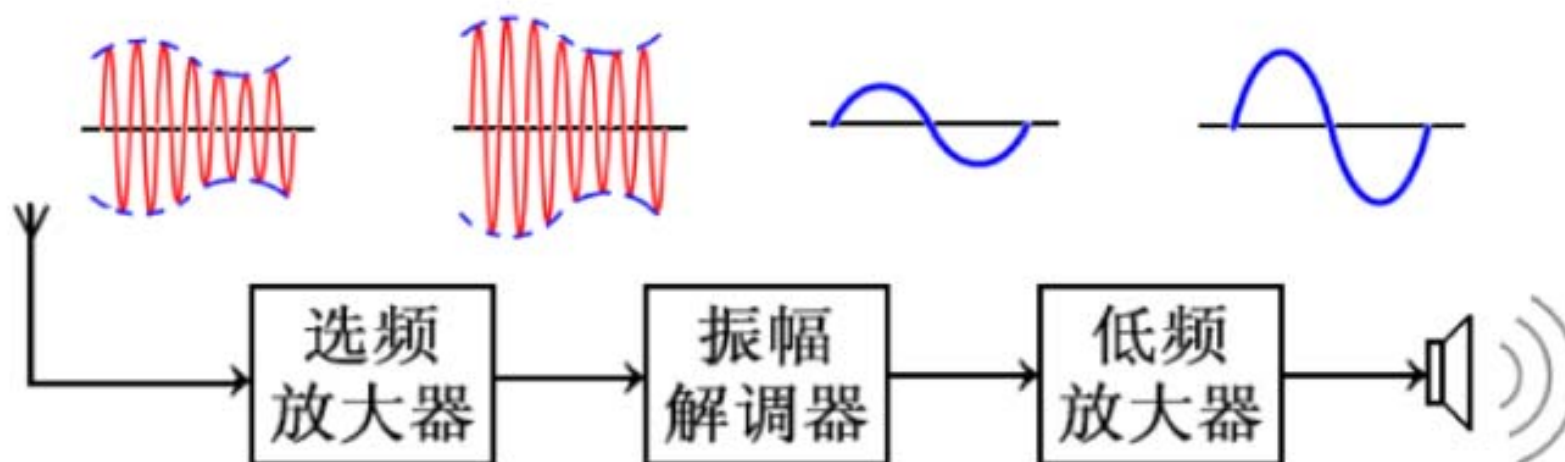




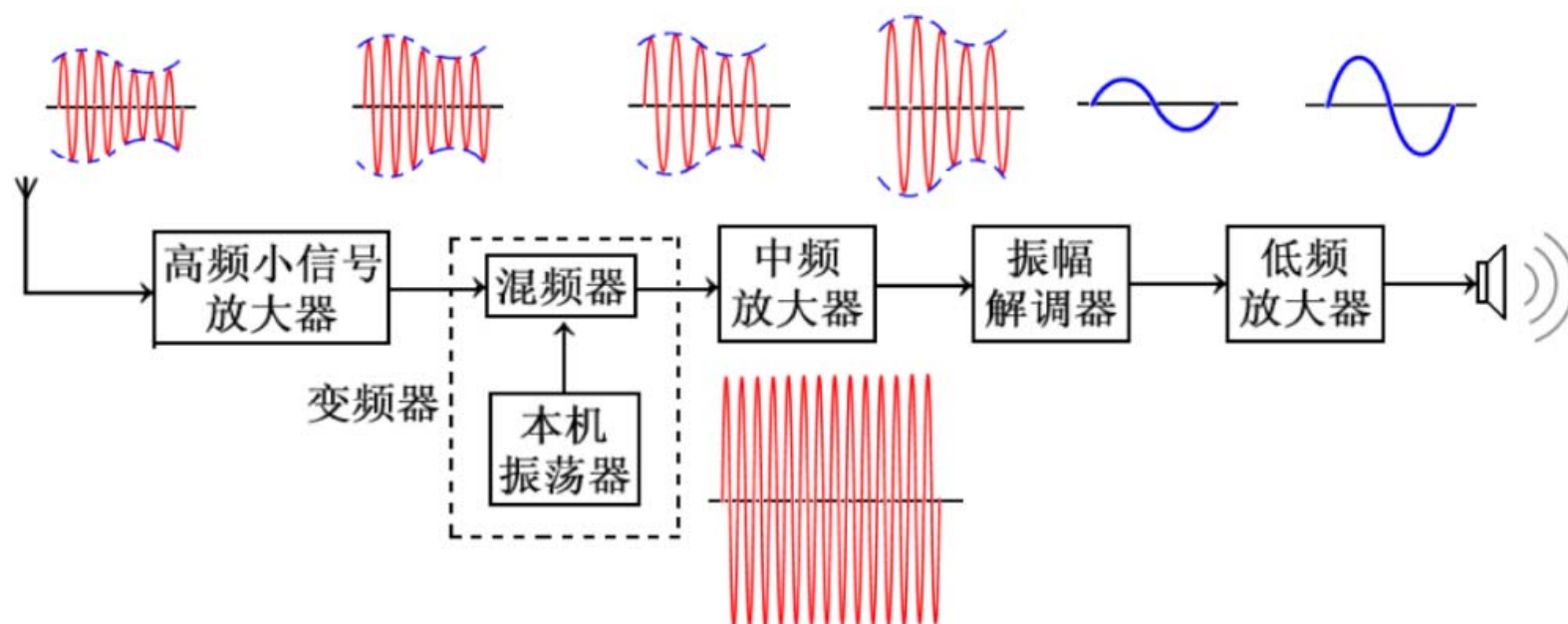
# 调幅调频的频谱图



# 调幅广播接收机框图——直接放大



# 调幅广播接收机框图——超外差





# 本章要点

- 调幅、调频、调相的概念，主要参数的计算。
- 普通调幅信号与双边带、单边带调幅信号的特点。
- 常见的调幅信号的调制与解调系统的原理以及应用。

