

CEC

# 振幅调制与解调 II

## Amplitude Modulation & Demodulation II

2025年5月22日

学而不厌 诲人不倦



# Chapter 7 振幅调制与解调

---

- ➡ §7.1 概述
- ➡ §7.2 调幅波的性质
- ➡ **§7.3 平方律调幅**
- ➡ §7.4 斩波调幅
- ➡ §7.5 模拟乘法器调幅
- ➡ §7.6 单边带信号的产生
- ➡ §7.7 残留边带调幅
- ➡ §7.8 高电平调幅
- ➡ §7.9 包络检波
- ➡ §7.10 同步检波
- ➡ §7.11 单边带信号的接收

# 回顾

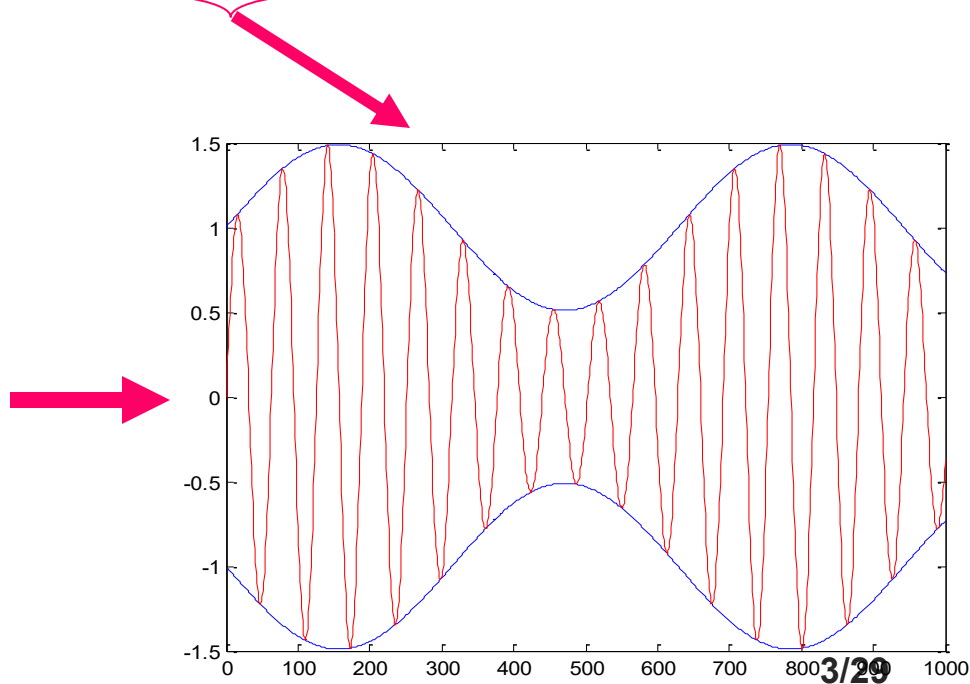
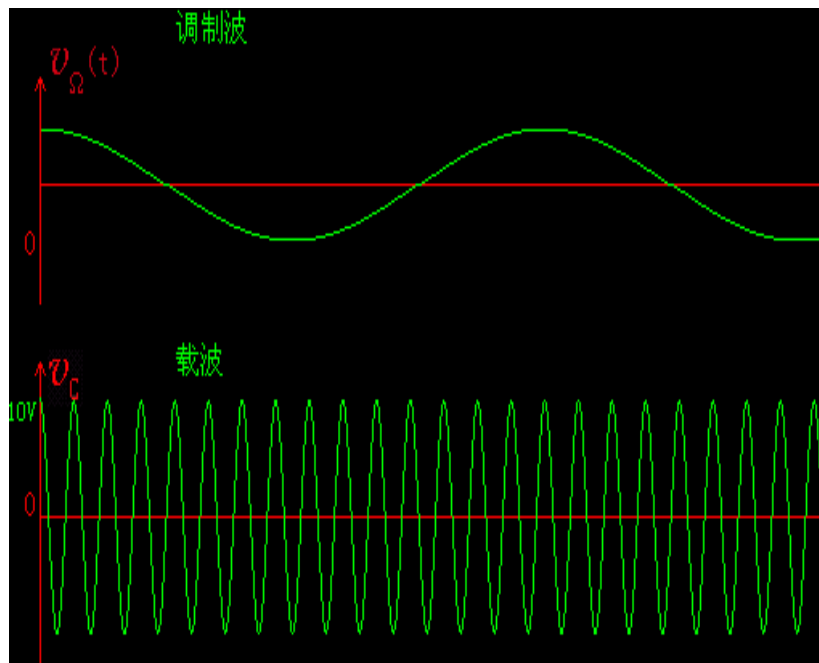
## ➤ 振幅调制 Amplitude Modulation

定义:

用调制信号去控制载波信号振幅, 使载波信号瞬时幅度随调制信号作线性变化的过程

调制方程:

$$v_{AM} = V_0 (1 + m_a \cos \Omega t) \cos \omega_0 t$$



## 7.3 平方律调幅

### ➤ 1. 工作原理

调幅波的共同之处都是在调幅前后产生了新的频率分量，也就是说都需要**用非线性器件来完成频率变换**。

这里将调制信号 $v_{\Omega}$ 与载波信号 $v_{\omega_0}$ 相加后，同时加入非线性器件，然后通过中心频率为 $\omega_0$ 的带通滤波器取出输出电压 $v_o$ 中的调幅波成分。

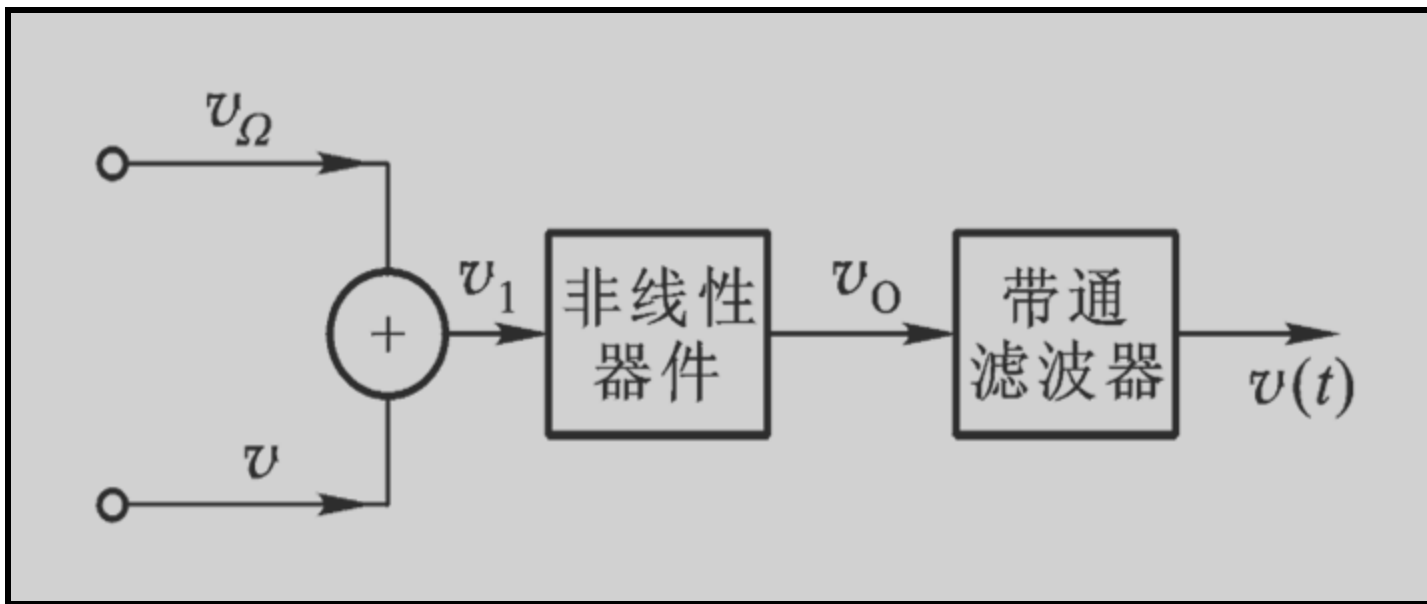


图 7.3.1 非线性调幅方框图

## 7.3 平方律调幅

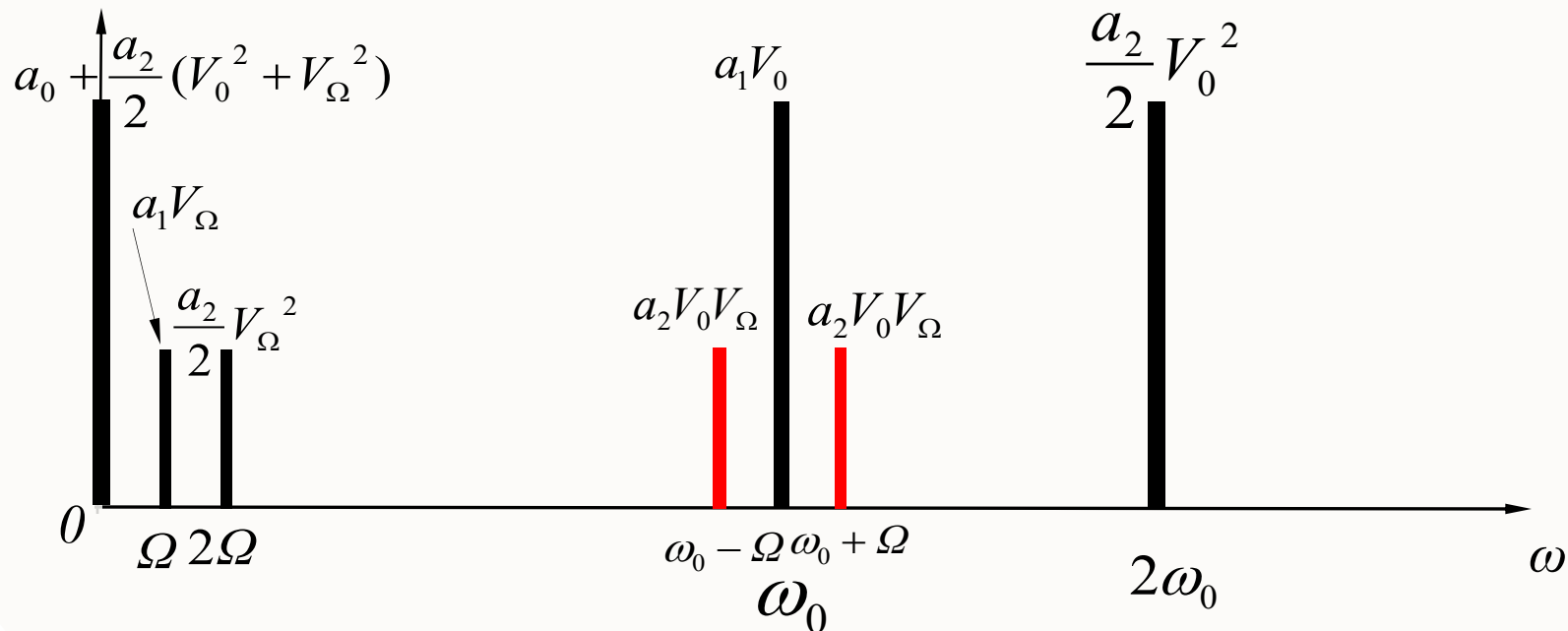
### ➤ 1. 工作原理

输入信号:  $v_i = v_o(\text{载波}) + v_\Omega(\text{调制信号})$

$$= V_0 \cos \omega_0 t + V_\Omega \cos \Omega t$$

非线性器件为二极管, 特性为:  $v_o = a_0 + a_1 v_i + a_2 v_i^2$  则:

$$v_o = a_0 + a_1 (V_0 \cos \omega_0 t + V_\Omega \cos \Omega t) + a_2 (V_0 \cos \omega_0 t + V_\Omega \cos \Omega t)^2$$



## 7.3 平方律调幅

### ➤ 1. 工作原理

$$\begin{aligned}
 & a_0 + \frac{1}{2}a_2(V_\Omega^2 + V_0^2) \dots\dots\dots \text{直流项} \\
 & + a_1 V_0 \cos \omega_0 t \dots\dots\dots \text{载波频率} \\
 & + a_1 V_\Omega^2 \cos \Omega t \dots\dots\dots \text{调制信号基频} \\
 & + a_2 V_\Omega V_0 [\cos(\omega_0 + \Omega)t + \cos(\omega_0 - \Omega)t] \dots\dots\dots \text{上、下边频} \\
 & + \frac{1}{2}a_2 V_0^2 \cos 2\omega_0 t \dots\dots\dots \text{载频二次谐波} \\
 & + a_1 V_\Omega \cos \Omega t \dots\dots\dots \text{调制信号基频} \\
 & + \frac{1}{2}a_2 V_\Omega^2 \cos 2\Omega t \dots\dots\dots \text{调制信号二次谐波}
 \end{aligned}$$

## 7.3 平方律调幅

### ➤ 1. 工作原理

∵产生调幅作用的是  $a_2 v_i^2$  项，故称平方律调幅。

滤波后输出普通调幅波电压表达式为：

$$v(t) = a_1 V_0 \cos \omega_0 t + a_2 V_\Omega V_0 [\cos(\omega_0 + \Omega)t + \cos(\omega_0 - \Omega)t]$$

$$= a_1 V_0 \cos \omega_0 t + 2a_2 V_\Omega V_0 \cos \Omega t \cos \omega_0 t$$

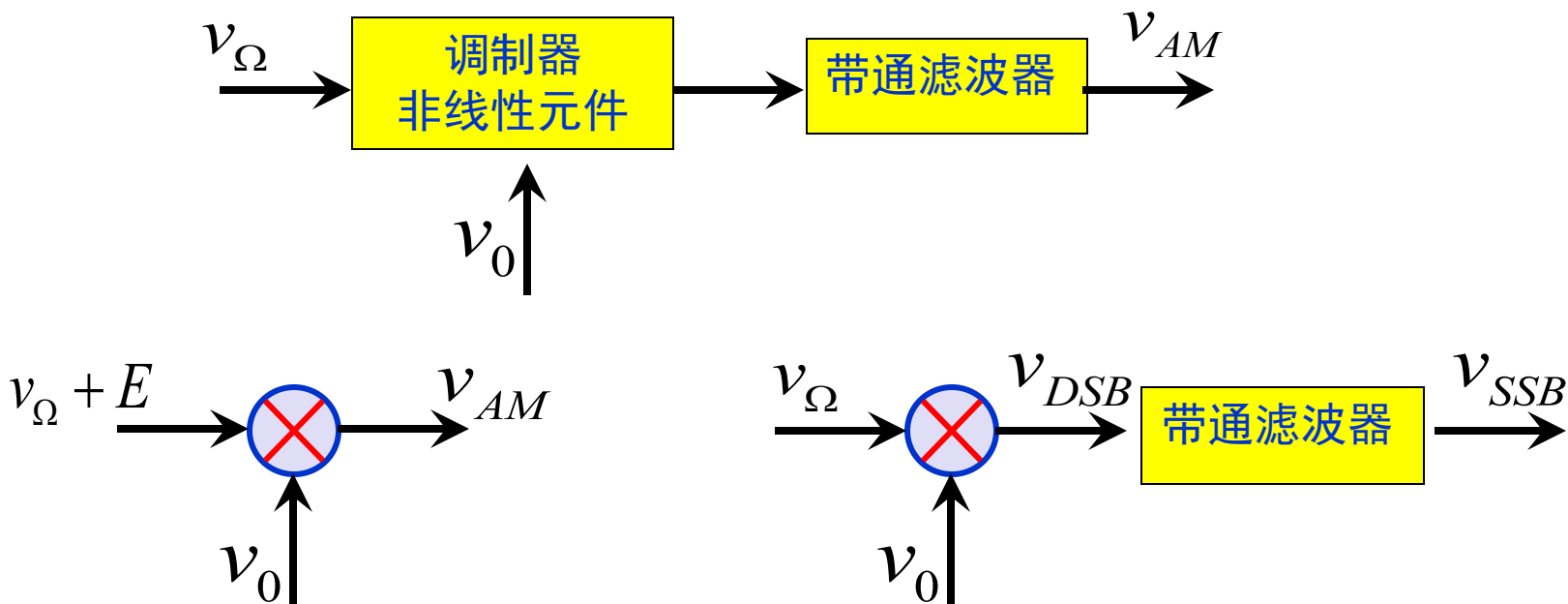
$$= a_1 V_0 \left( 1 + \frac{2a_2}{a_1} V_\Omega \cos \Omega t \right) \cos \omega_0 t$$

可知：调幅度  $m_a = \frac{2a_2}{a_1} V_\Omega$

- 调幅度  $m_a$  的大小由调制信号电压振幅  $V_\Omega$  和调制特性曲线决定，即由  $a_1, a_2$  决定，通常  $a_2 \ll a_1$ ，因此该方法调幅度不大
- 电子管或晶体管应工作在甲类非线性状态，效率低，因此该方法用于低电平调制。

## 7.3 平方律调幅

### ➤ 2. 调幅信号产生方法



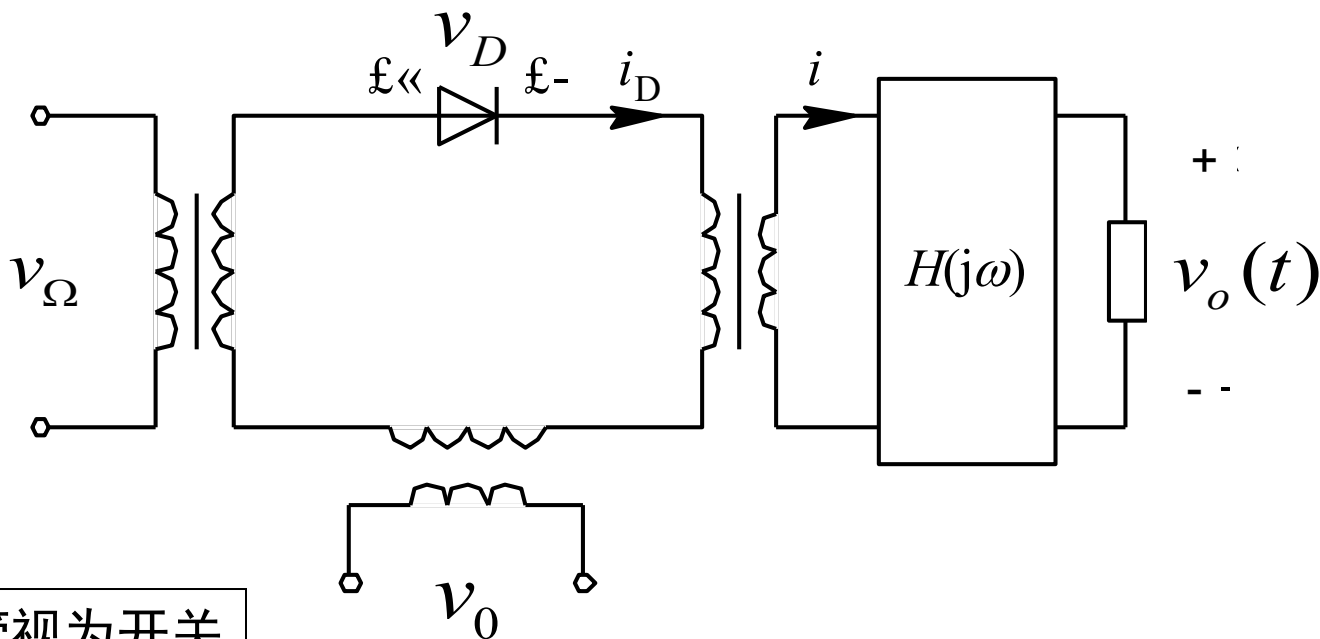
调幅信号产生电路的核心器件：**相乘器**（非线性器件）



## 7.3 平方律调幅

### ➤ 2. 调幅信号产生方法

#### 单二极管调制电路



将二极管视为开关

$$i_D = g_D (V_0 \cos \omega_0 t + V_\Omega \cos \Omega t) S(\omega_0 t)$$

其中开关函数表示为：

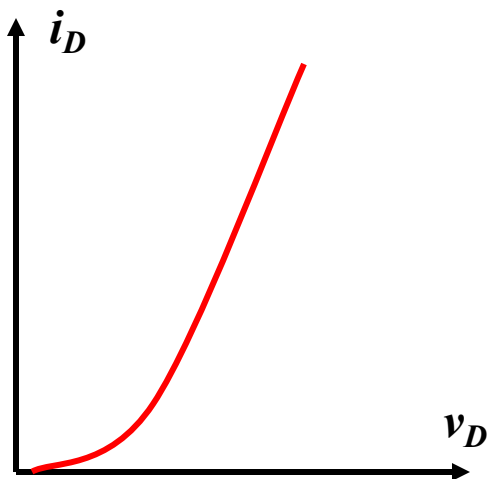
$$S(\omega_0 t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos(\omega_0 t) - \frac{2}{3\pi} \cos(3\omega_0 t) + \dots$$

## 7.3 平方律调幅

### ➤ 2. 调幅信号产生方法

#### 单二极管调制电路

#### 1. 将二极管视为非线性器件

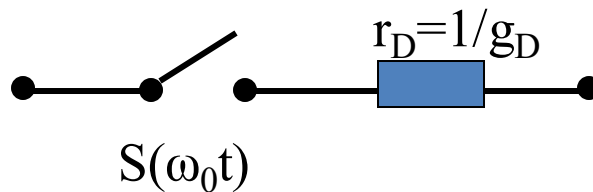


$$i_D = a_0 + a_1 v + a_2 v^2 + a_3 v^3 + \dots$$

$$\text{取: } i_D = a_0 + a_1 v + a_2 v^2$$

$$v = K(v_\Omega + v_0)$$

二极管等效为：

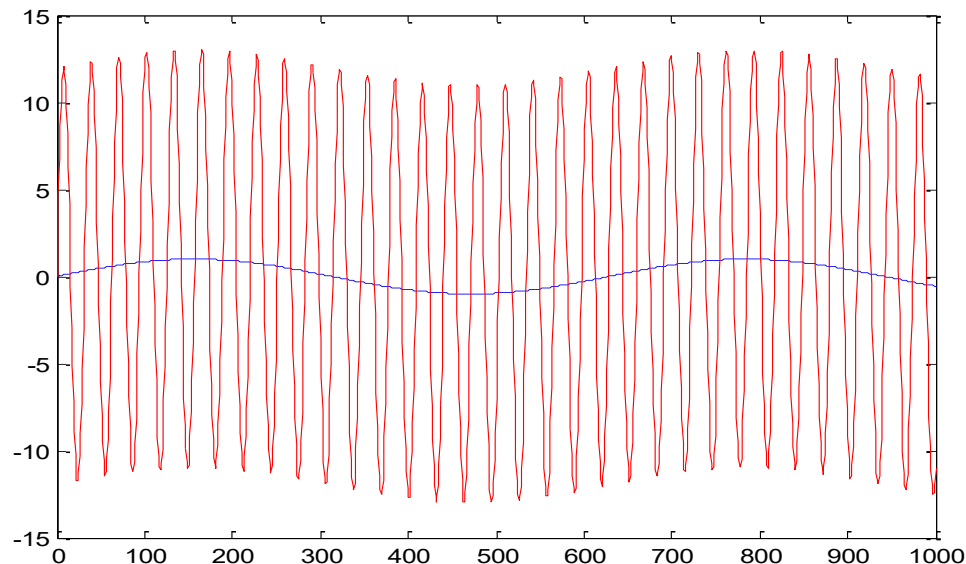
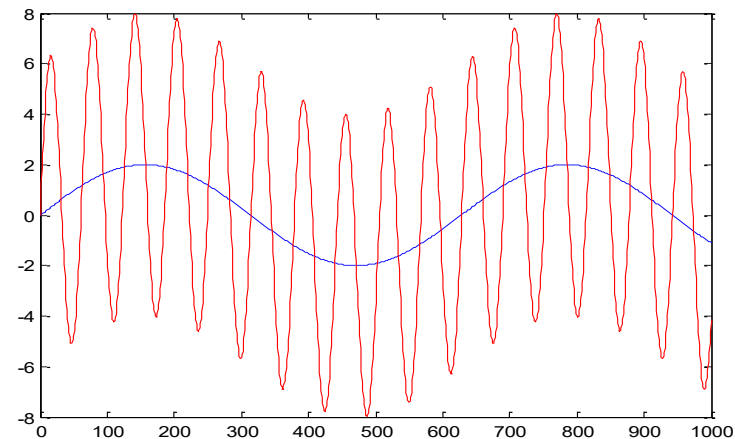
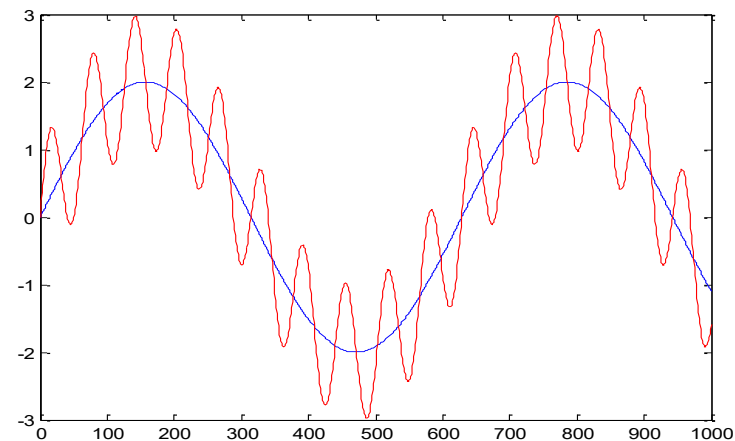


$$S(\omega_0 t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos(\omega_0 t) - \frac{2}{3\pi} \cos(3\omega_0 t) + \dots$$

## 7.3 平方律调幅

### ➤ 2. 调幅信号产生方法

#### 单二极管调制电路



单二极管调制条件

$$v_0 \gg v_\Omega$$

$$\omega_0 \gg \Omega$$

此时，开关的开与关取决于  $v_0$  的正负。

## 7.3 平方律调幅



### ➤ 3. 平衡调幅器

- 利用两个平方律调幅器的电路对称连接可以构成二极管平衡电路
- 可以实现抑制载波的双边带调制 (DSB-SC)

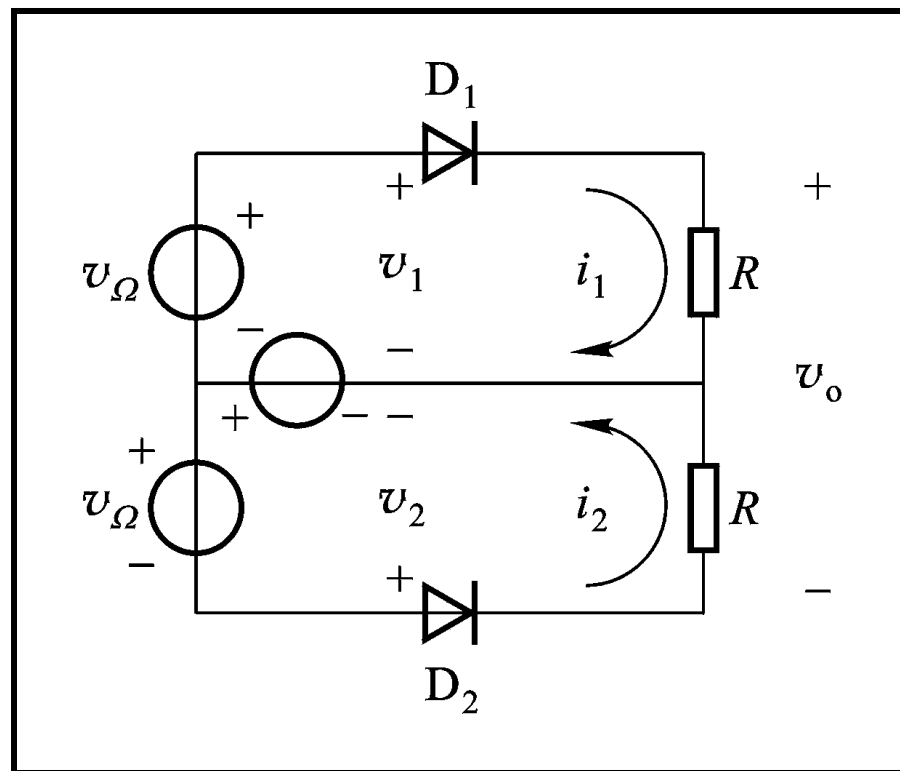
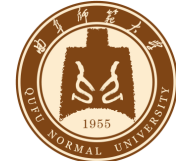


图 7.3.2 串联双二极管平衡调幅器简化电路

## 7.3 平方律调幅



### ➤ 3. 平衡调幅器

总的输出电压  $v_o = (i_1 - i_2)R$

总的输出电流  $i = i_1 - i_2$

平衡的含义：

1. 两路调制信号完全相同
2. 两个二极管特性完全相同
3. 抑制载波

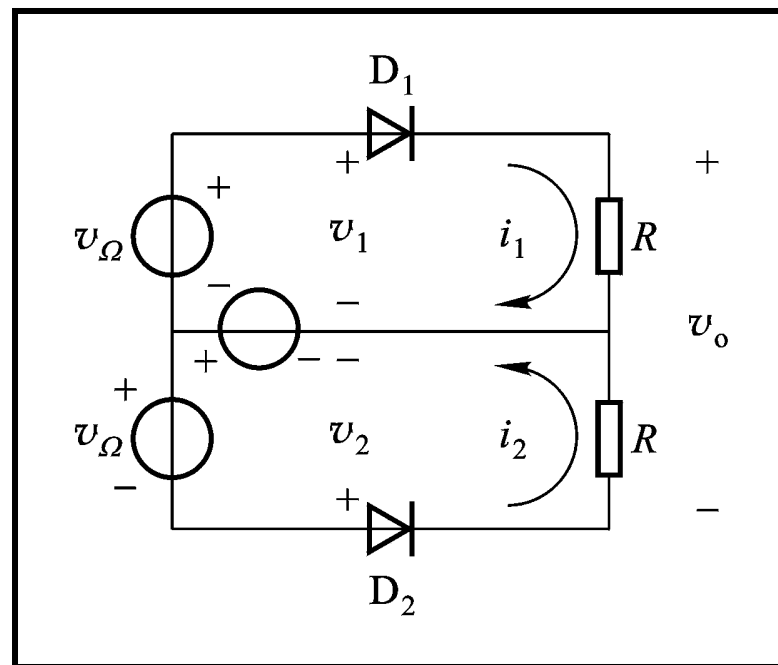


图 7.3.2 串联双二极管平衡调幅器简化电路

如果要获得抑制载波的双边带信号，观察输出电流表示式

$$i_1 = a_0 + a_1(V_0 \cos \omega_0 t + V_\Omega \cos \Omega t) + a_2(V_0 \cos \omega_0 t + V_\Omega \cos \Omega t)^2$$

$$i_2 = a_0 + a_1(V_0 \cos \omega_0 t - V_\Omega \cos \Omega t) + a_2(V_0 \cos \omega_0 t - V_\Omega \cos \Omega t)^2$$



# Chapter 7 振幅调制与解调

---

- ➡ §7.1 概述
- ➡ §7.2 调幅波的性质
- ➡ §7.3 平方律调幅
- ➡ **§7.4 斩波调幅**
- ➡ **§7.5 模拟乘法器调幅**
- ➡ §7.6 单边带信号的产生
- ➡ §7.7 残留边带调幅
- ➡ §7.8 高电平调幅
- ➡ §7.9 包络检波
- ➡ §7.10 同步检波
- ➡ §7.11 单边带信号的接收

## 7.4 斩波调幅

### ➤ 1. 工作原理

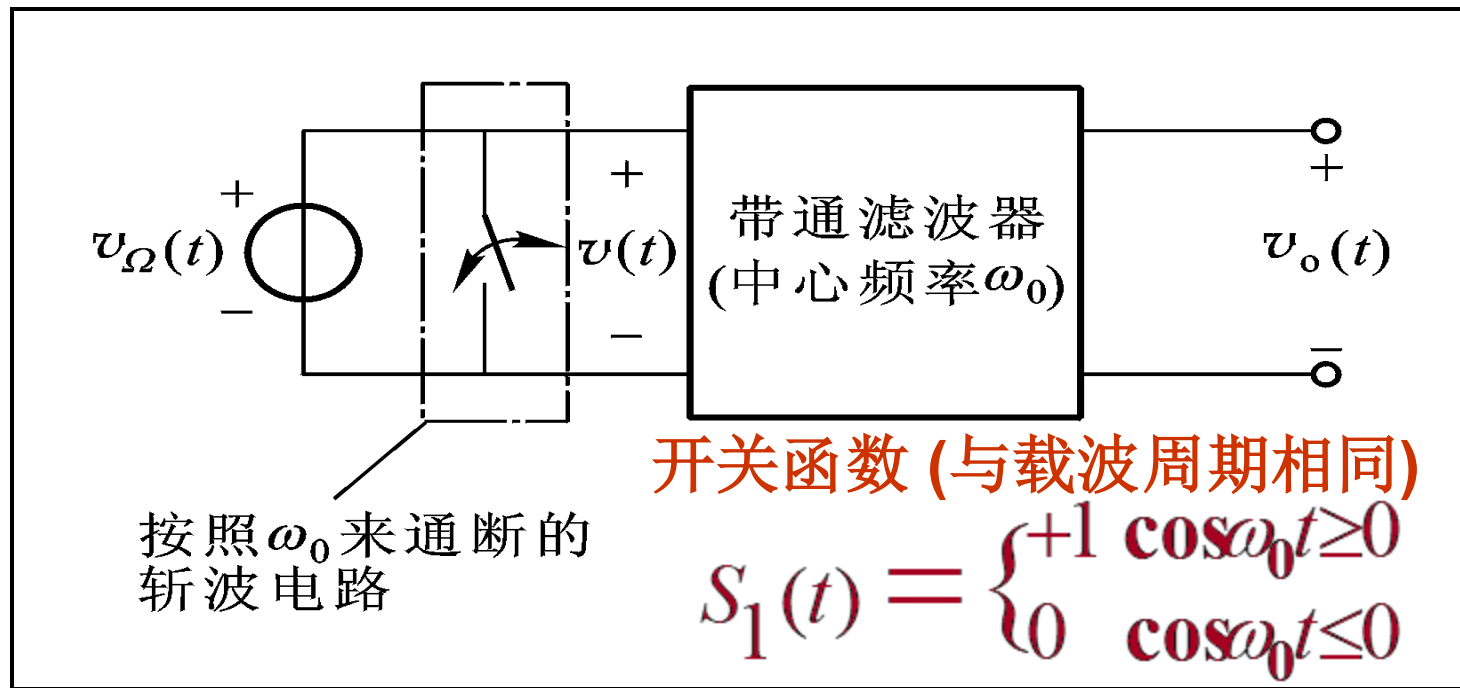
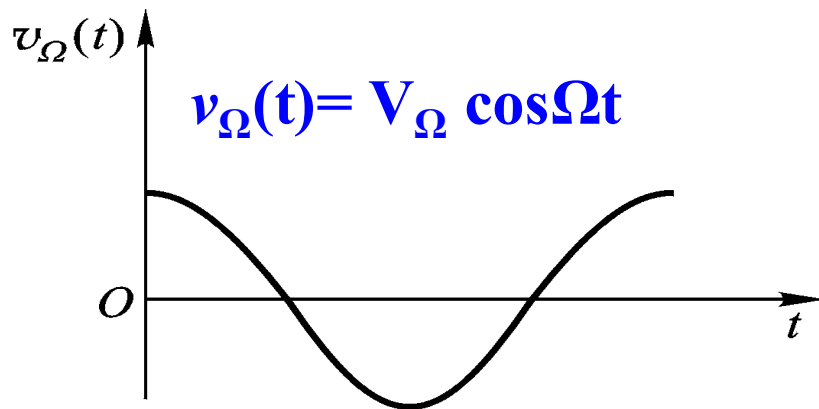


图 7.4.1 斩波调幅器方框图

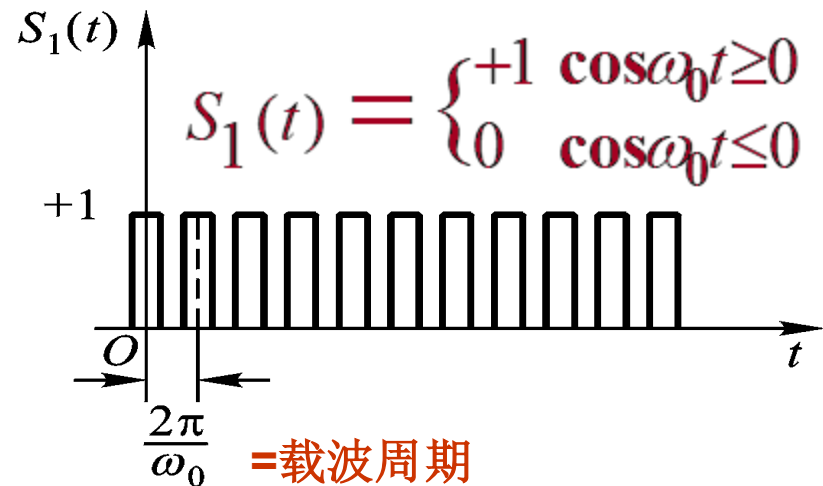
- 斩波调幅是将调制信号通过一个受载波频率控制的开关电路(斩波电路), 使调制信号输出波形被“斩”成周期为  $2\pi/\omega_0$ (载波周期) 的脉冲, 输出波形就包含  $\omega_0 \pm \Omega$  频率成分及谐波。

## 7.4 斩波调幅

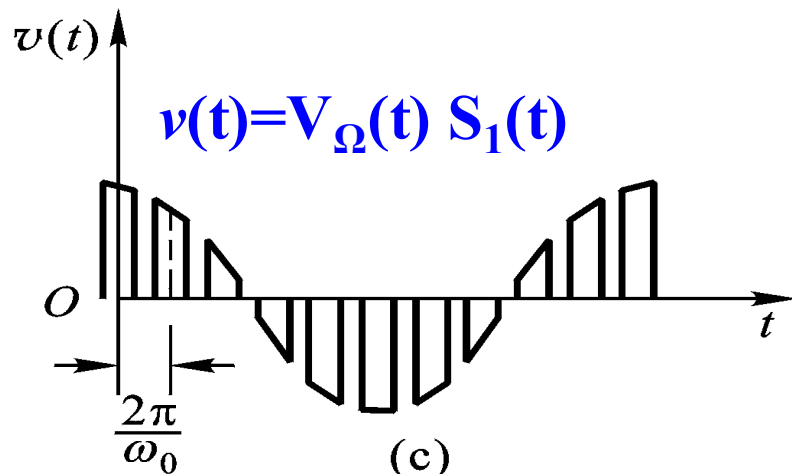
### ➤ 1. 工作原理



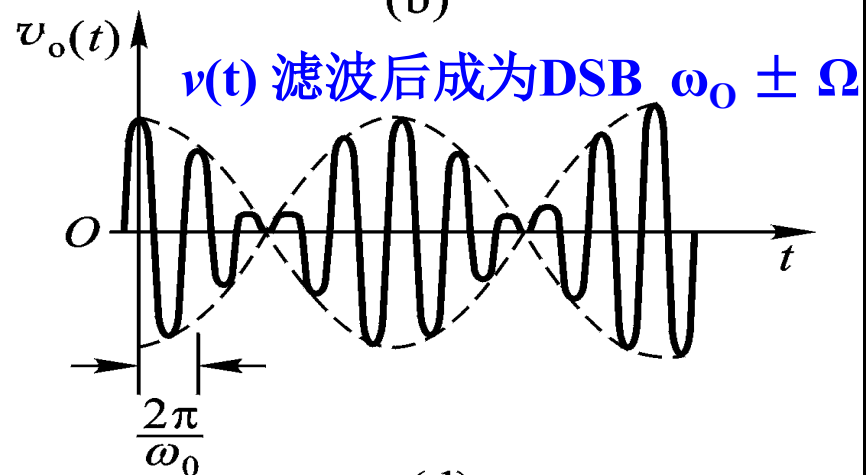
(a)



(b)



(c)



(d)



## 7.4 斩波调幅

### ➤ 1. 工作原理

斩波后电压为： $v(t) = V_{\Omega}(t) S_2(t)$

开关函数  $S_2(t)$  傅立叶级数展开式为：

$$S_2(t) = \frac{4}{\pi} \cos \omega_0 t - \frac{4}{3\pi} \cos 3\omega_0 t + \frac{4}{5\pi} \cos 5\omega_0 t - \dots$$

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

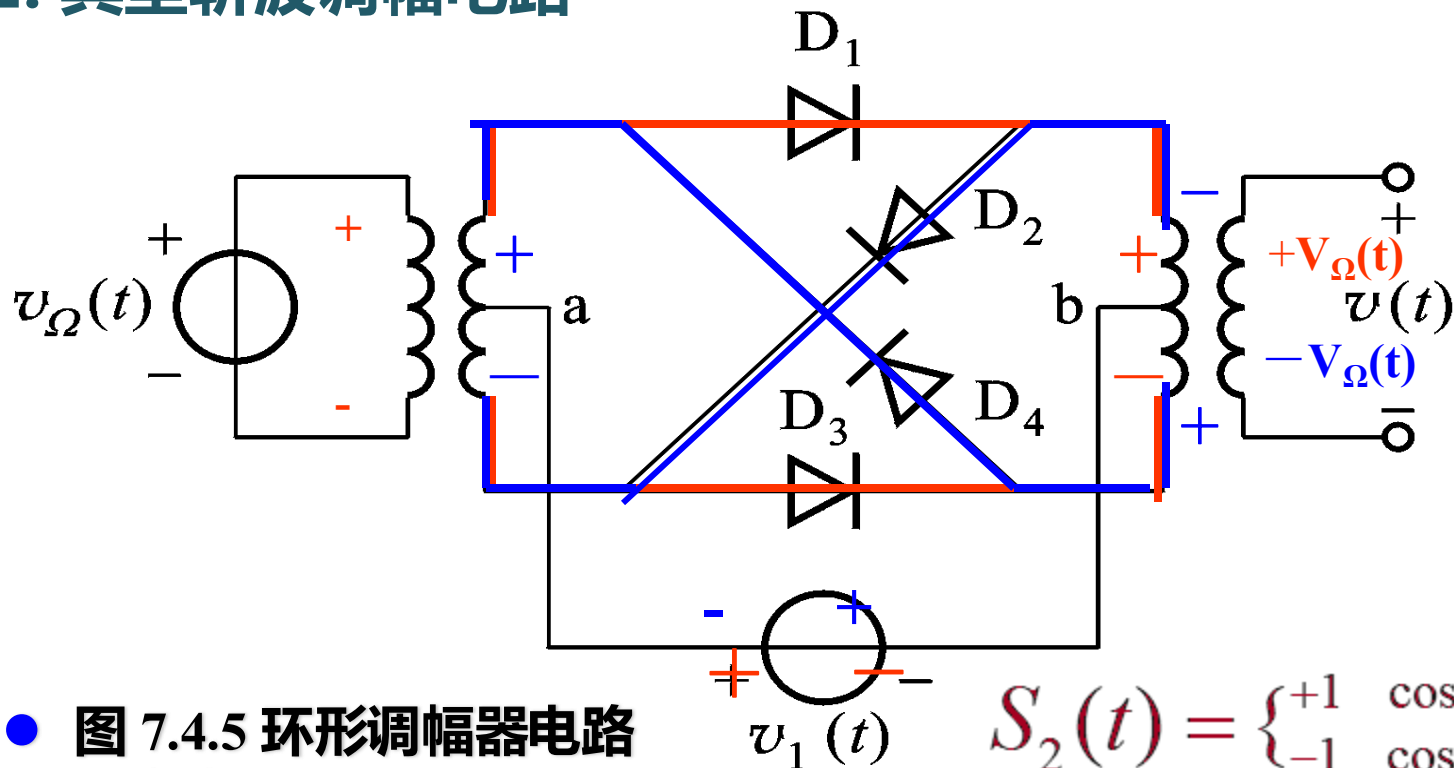
将  $V_{\Omega}(t)$  和  $S_2(t)$  代入  $v(t)$  后，得斩波后电压为：

$$v(t) = \frac{4}{\pi} V_{\Omega} \cos \Omega t \cos \omega_0 t - \frac{4}{3\pi} V_{\Omega} \cos \Omega t \cos 3\omega_0 t + \dots$$

- 通过中心频率为  $\omega_0$  的带通滤波器，即可获得  $\omega_0 \pm \Omega$  项，可见输出电压为载波被抑制的双边带调幅波 DSB-SC
- 对比可知：平衡斩波调幅没有低频分量，且振幅提高一倍

## 7.4 斩波调幅

### ➤ 2. 典型斩波调幅电路

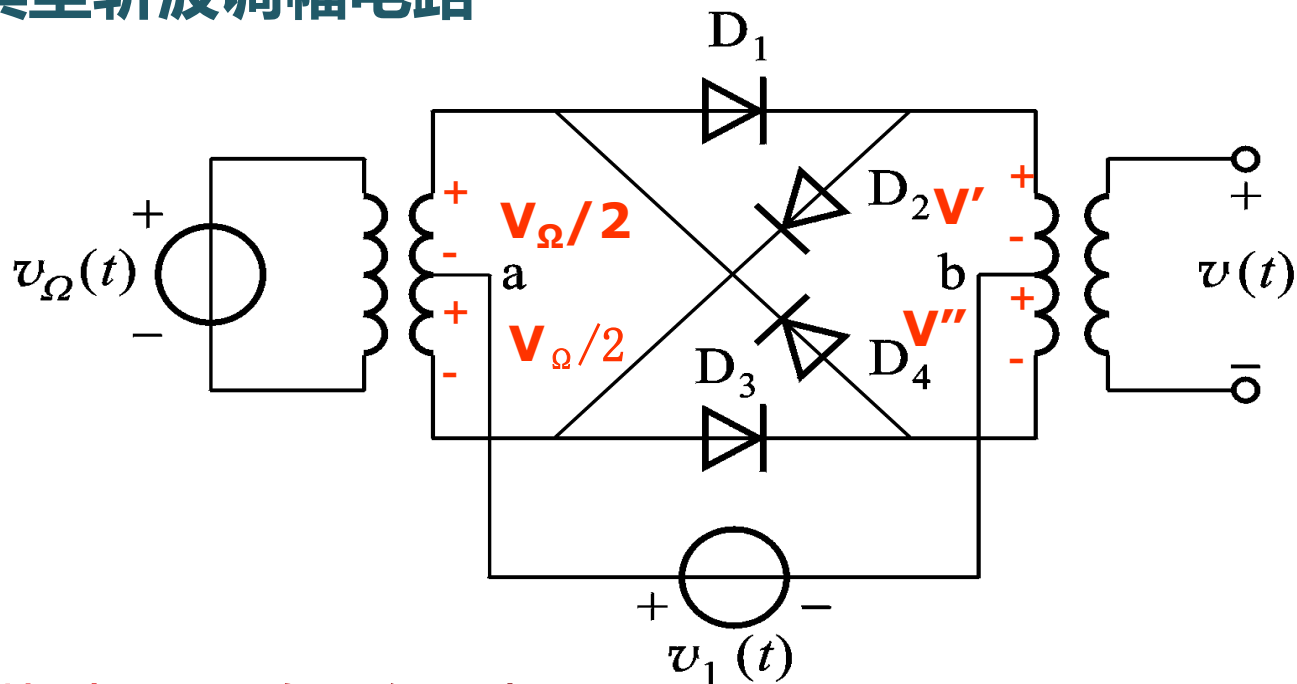


载波  $v_1(t)$  左+右-  $\rightarrow v_a > v_b \rightarrow D1 D3$  导通  $\rightarrow$  输出  $v(t) = V_{\Omega}(t)$

载波  $v_1(t)$  左-右+  $\rightarrow v_a < v_b \rightarrow D2 D4$  导通  $\rightarrow$  输出  $v(t) = -V_{\Omega}(t)$

## 7.4 斩波调幅

### ➤ 2. 典型斩波调幅电路

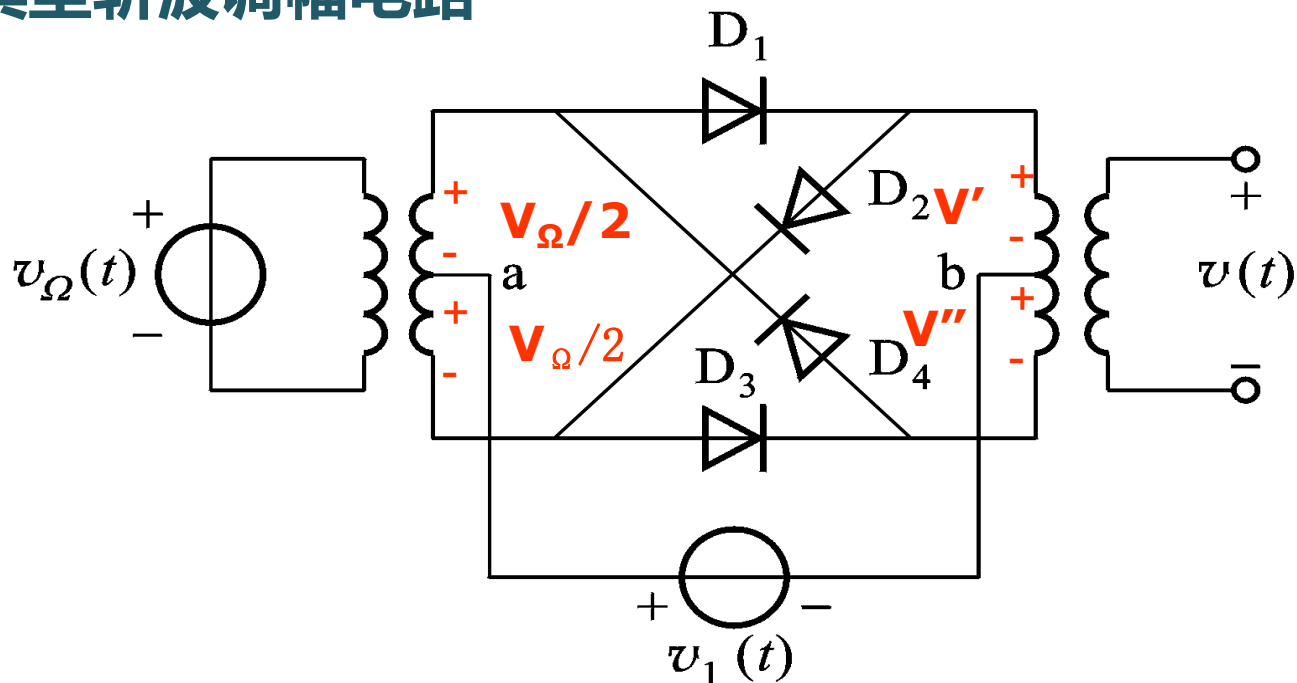


• 载波  $v_1(t)$  左+右-时,

- ✓ 绕行回路  $v_1 \rightarrow a \rightarrow D1 \rightarrow b$  列 KVL:  $v_1(t) + v_\Omega(t)/2 - v' = 0$
- ✓ 绕行回路  $v_1 \rightarrow a \rightarrow D3 \rightarrow b$  列 KVL:  $v_1(t) - v_\Omega(t)/2 + v'' = 0$
- ✓ 解得:  $v' + v'' = V_\Omega(t) = v(t)$

## 7.4 斩波调幅

### ➤ 2. 典型斩波调幅电路

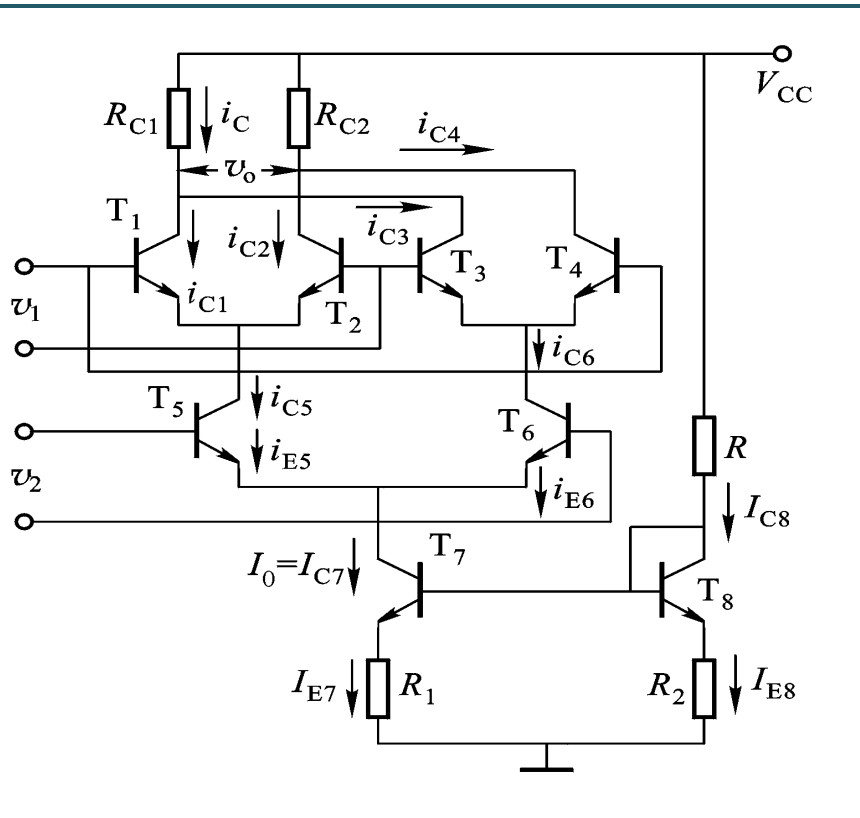


• 载波  $v_1(t)$  左-右+时, 表示为:  $-v_1(t)$

- ✓ 绕行回路  $v_1 \rightarrow b \rightarrow D2 \rightarrow a$  列 KVL:  $-v_1(t) + v_\Omega(t)/2 + v' = 0$
- ✓ 绕行回路  $v_1 \rightarrow b \rightarrow D4 \rightarrow a$  列 KVL:  $-v_1(t) - v_\Omega(t)/2 - v'' = 0$
- ✓ 解得:  $v' + v'' = -V_\Omega(t) = v(t)$

## 7.5 模拟乘法器调幅

### ► 模拟乘法器



输出电压  $v_O$

输入信号电压  $v_1$   $v_2$

输入，输出关系为

$$v_O = K_1 v_1 v_2 \quad (K_1 \text{ 为常数})$$

设：载波  $v_1 = V_{1m} \cos \omega_0 t$

设：调制信号  $V_2 = V_{2m} \cos \Omega t$

则，输出信号为：

$$v_O = K_1 v_1 v_2 = K_1 V_{1m} V_{2m} \cos \omega_0 t \cos \Omega t$$

$$= \frac{1}{2} K_1 V_{1m} V_{2m} [ \cos(\omega_0 + \Omega)t + \cos(\omega_0 - \Omega)t ]$$



# Chapter 7 振幅调制与解调

---

- ➡ §7.1 概述
- ➡ §7.2 调幅波的性质
- ➡ §7.3 平方律调幅
- ➡ §7.4 斩波调幅
- ➡ §7.5 模拟乘法器调幅
- ➡ **§7.6 单边带信号的产生**
- ➡ §7.7 残留边带调幅
- ➡ §7.8 高电平调幅
- ➡ §7.9 包络检波
- ➡ §7.10 同步检波
- ➡ §7.11 单边带信号的接收

## 7.6 单边带信号的产生

### ➤ 单边带通信

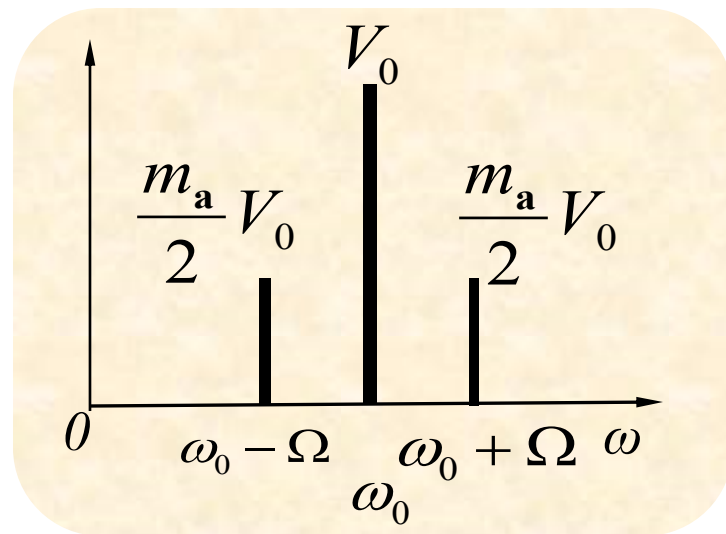
$$\begin{aligned} v_{\text{AM}}(t) &= V_0(1 + m_a \cos \Omega t) \cos \omega_0 t \\ &= V_0 \left[ \cos \omega_0 t + \frac{1}{2} m_a \cos(\omega_0 + \Omega)t + \frac{1}{2} m_a \cos(\omega_0 - \Omega)t \right] \end{aligned}$$

优点:

- ◆ 使所容纳的频道数目增加一倍，大大提高短波波段的利用率。
- ◆ 单边带制能获得更好的通信效果。
- ◆ 单边带制的选择性衰落现象要轻得多。

缺点:

- ◆ 要求收、发设备的频率稳定度高，设备复杂，技术要求高。



## 7.6 单边带信号的产生

### ➤ 1. 滤波器法

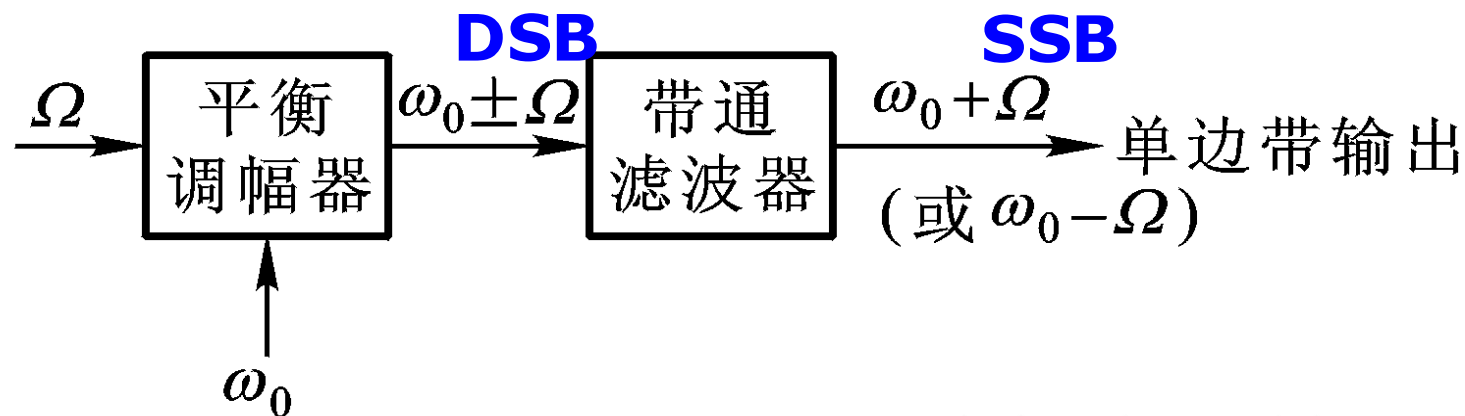
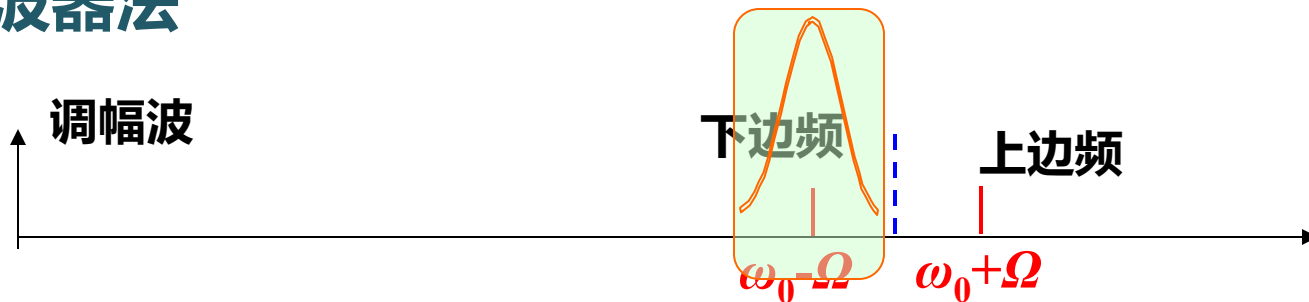


图 7.6.1 滤波器法原理方框图

- 这种方法对滤波器要求很高，而且载波频率不能太高，需要通过多级滤波逐步将载波频率提高到所要求的工作频率。
- 该方法性能稳定是目前干线通信采用的标准形式。



## 7.6 单边带信号的产生

### ➤ 1. 滤波器法

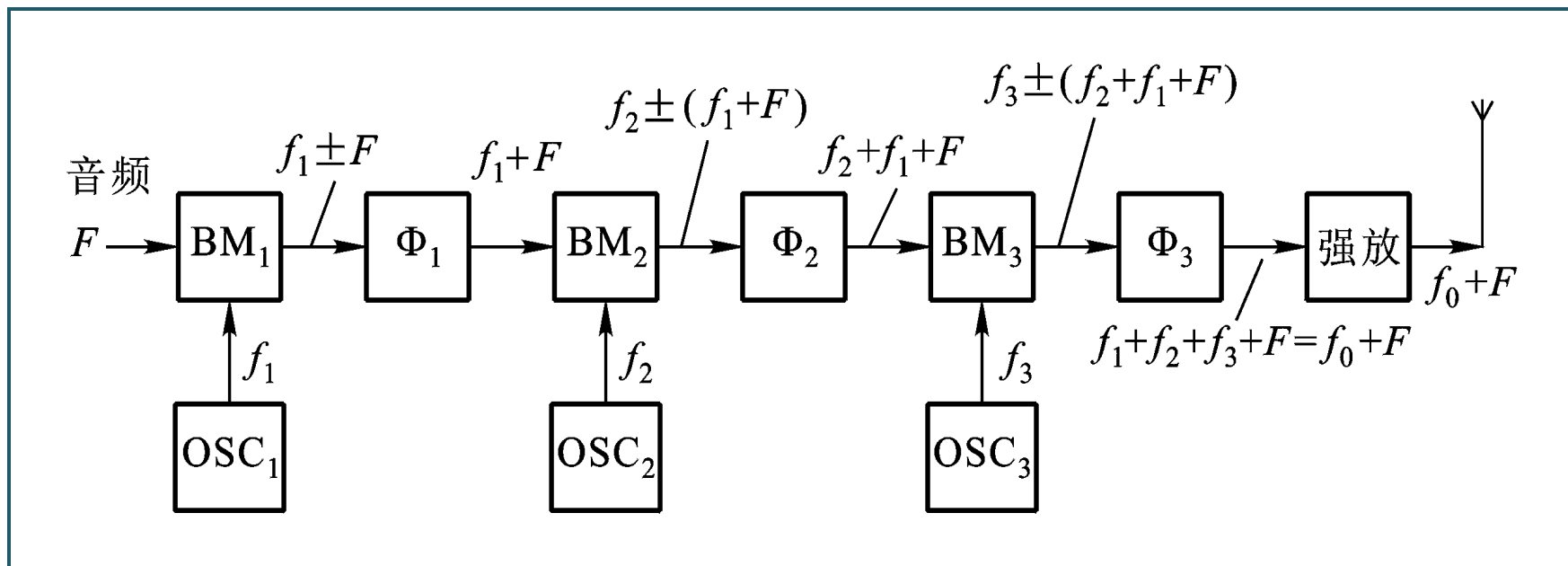


图 9.6.2 滤波器法单边带发射机方框图

必须强调指出，**提高单边带的载波频率决不能用倍频的方法**。因为倍频后，音频频率  $F$  也跟着成倍增加，使原来的调制信号变了样，产生严重的失真。这是绝对不允许的。

## 7.6 单边带信号的产生

## ➤ 1. 滤波器法

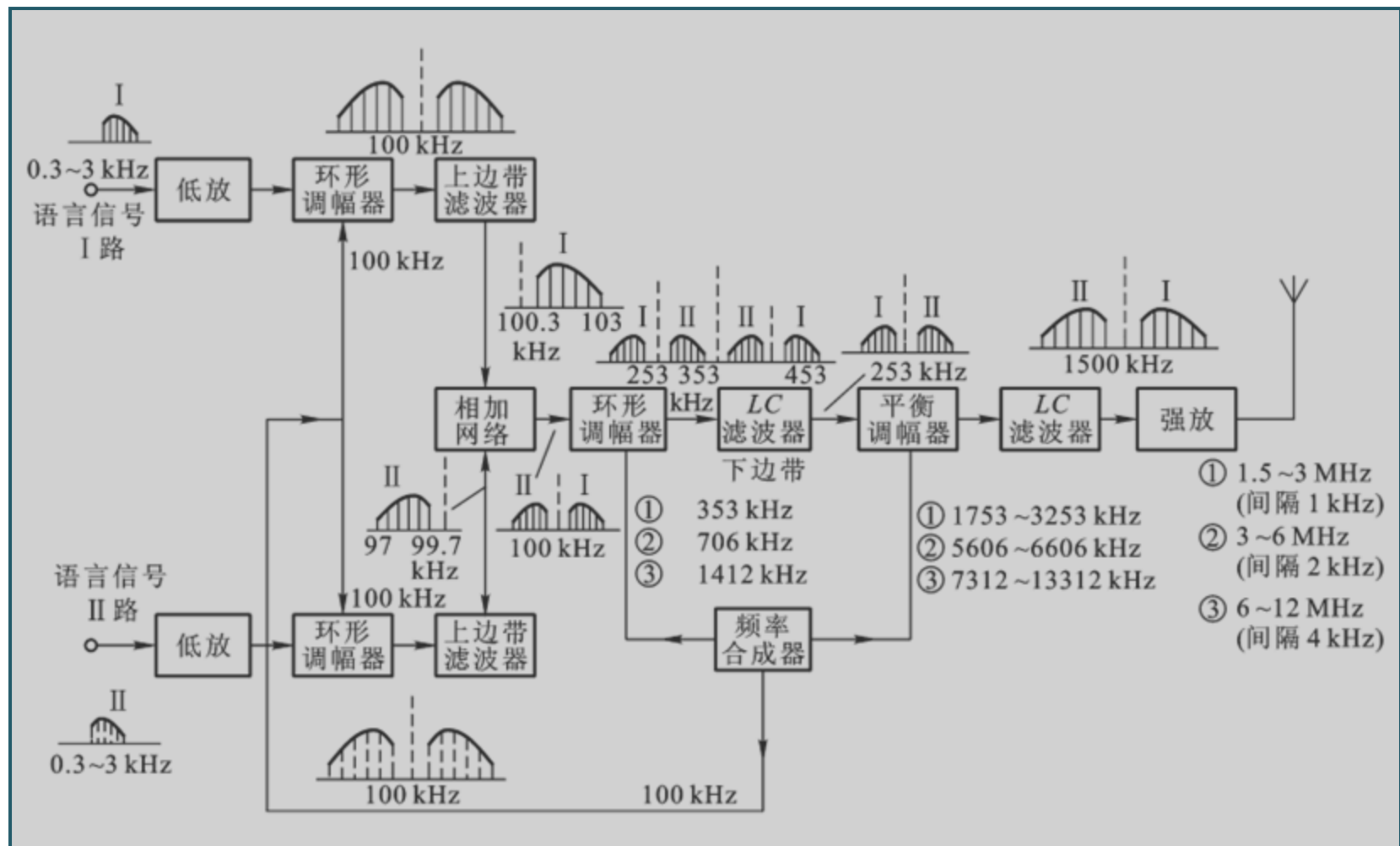


图 7.6.3 单边带发射机方框图举例

## 7.6 单边带信号的产生

### ➤ 2. 相移法

最突出问题：调制信号 $90^\circ$  相移非常困难

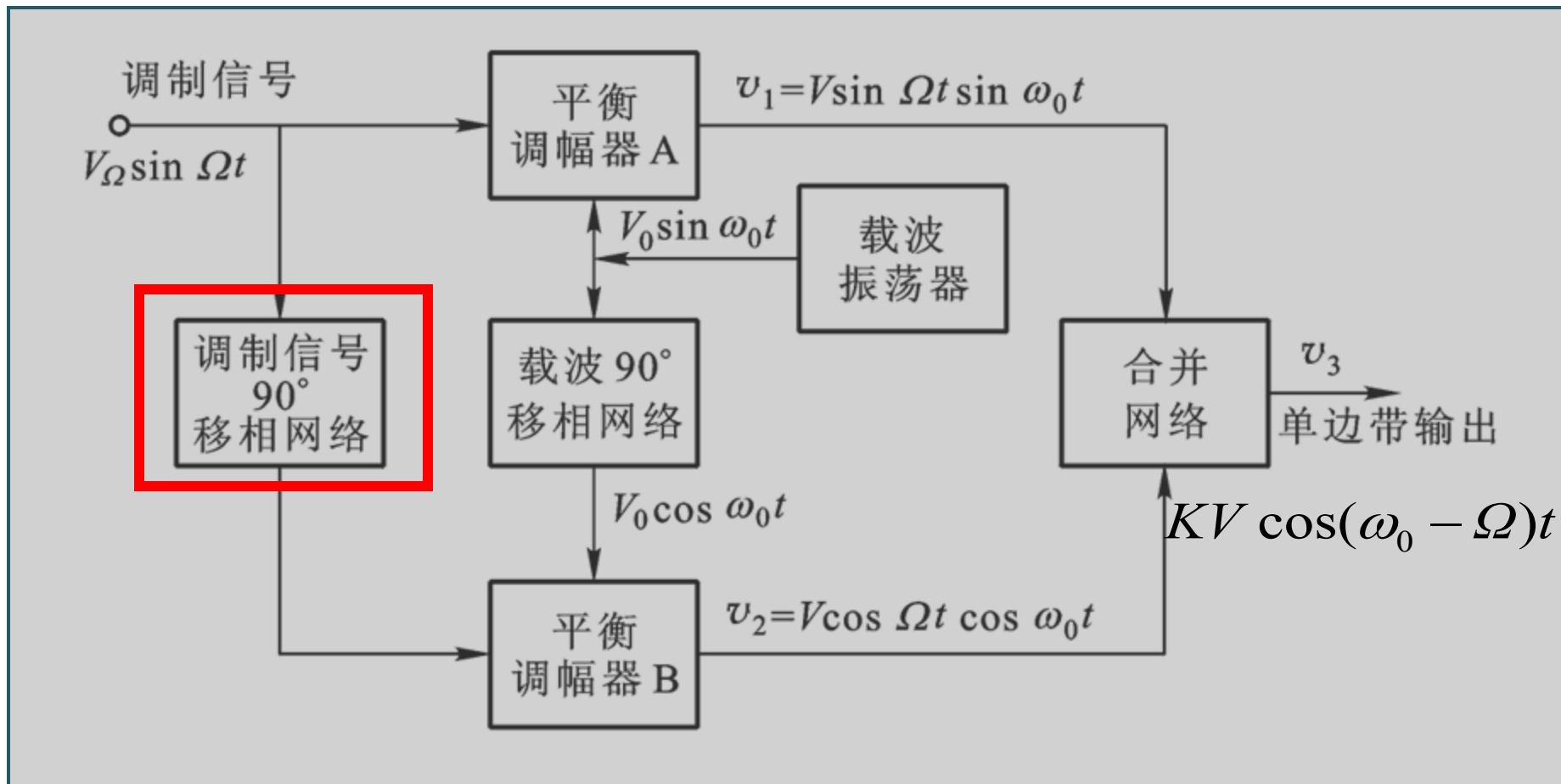


图 9.6.4 相移法单边带调制器方框图

## 7.6 单边带信号的产生

### ➤ 3. 修正的移相滤波法

90° 移相网络工作于固定频率

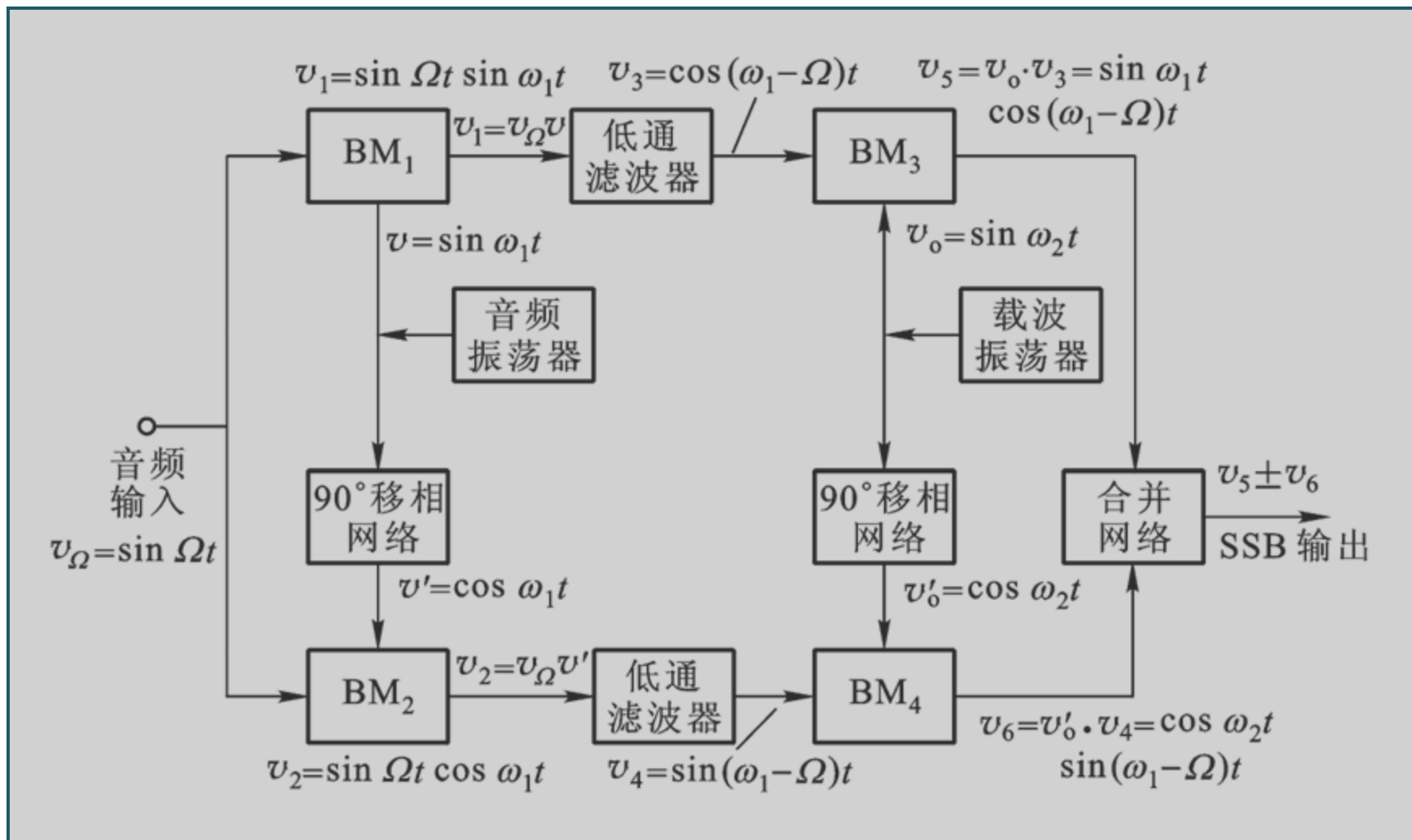


图 9.6.5 产生单边带信号的第三种方法



## 本章小结

1. 掌握**调制解调的含义**：常见调制方式AM FM PM。
2. 掌握**调幅波的性质**：调制过程数学描述、信号频谱、功率关系。  
理解各种调幅波特性，调制系数、表达式、波形、给定信号会画频谱，求解功率。
3. 掌握**幅度调制常见方式**：  
平方律：单二极管、双二极管平衡调制（优点）；斩波调幅；**乘法器调幅**原理；高电平调幅（次要）；单边带信号产生方法。



*Thank You !*

Q & A