



廣東工業大學
Guangdong University of Technology

广东工业大学

通信电路与系统

信息工程学院

李志忠



廣東工業大學
Guangdong University of Technology

广东工业大学

第六章 振幅调制与解调电路

信息工程学院

李志忠

目录

6.1 概论

6.2 低电平调幅电路

6.3 高电平调幅电路

6.4 单边带信号的产生

6.5 包络检波器

◆ 第六章 振幅调制电路

本章教学基本要求：

了解调制的作用，重点掌握调幅信号的定义、数学表达式、波形、频谱和功率等基本特征。

重点掌握典型幅度调制电路的结构、工作原理和分析方法和性能特点。

◆ 6.1 概述

调制-原因

切实可行的天线尺寸：天线几何尺寸 vs. $\frac{1}{4} \times$ 信号波长

例如：音频信号 20Hz ~ 20KHz

频率	20Hz	20KHz
波长	15000km	15km
天线尺寸	3750km	3.75km

“中国天眼”
口径500m

调制 → 高载波频率

◆ 6.1 概述

一、调制：为什么要引入调制？

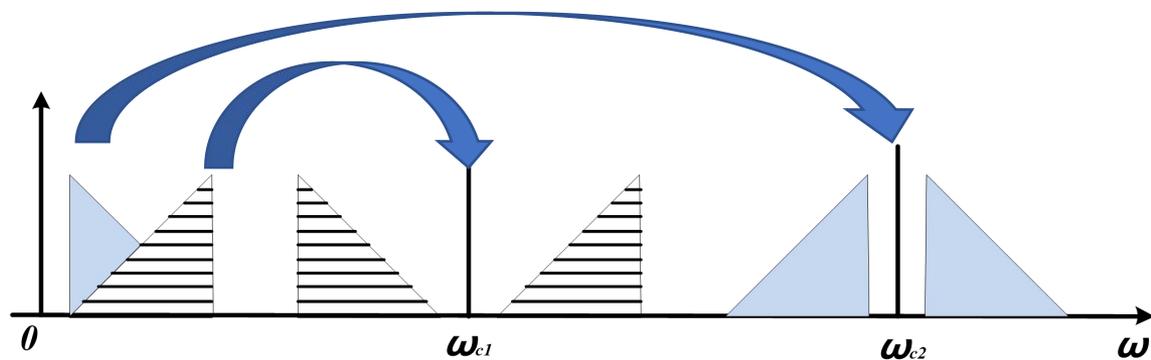


◆ 6.1 概述

一、调制：为什么要引入调制？

调制一原因

频分复用



调制 → 频谱搬移

◆ 6.1 概述

一、调制：为什么要引入调制？

调制—原因

可实现的回路带宽—“相对带宽”

}	低频（音频）	20Hz~20kHz	$\frac{BW}{f_0} = \frac{20k}{10k} = 2$
	高频（射频）	AM广播信号 535kHz~1605kHz	$\frac{BW}{f_0} = \frac{20k}{1000k} = \frac{1}{50}$

高频窄带



◆ 6.1 概述

一、调制：为什么要引入调制？

1、调制的定义：

将需传送的基带信号加载到高频信号上去的过程称为调制。

基带信号

通信中所需传送的信息通过换能器转换成电信号，此电信号是占有一定频谱宽度的低频信号，通常称为基带信号。

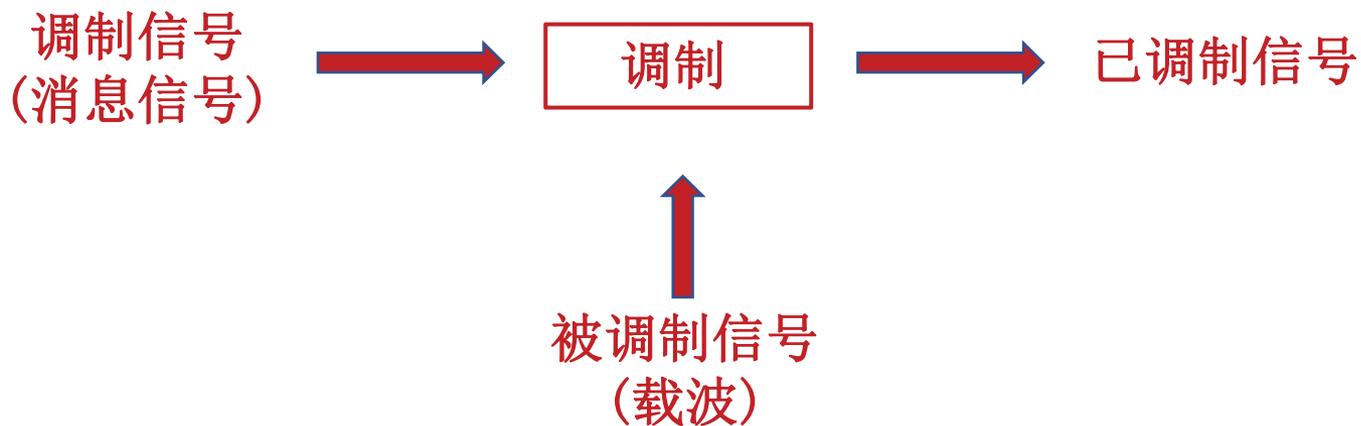
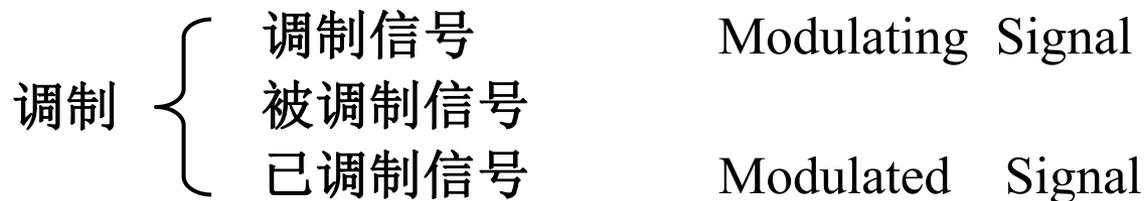
2、调制的作用：

将基带信号加载到高频信号上，用高频信号作为运载工具，能够较好地实现多路有选择性的通信。基带信号在调制时又常称调制信号。

◆ 6.1 概述

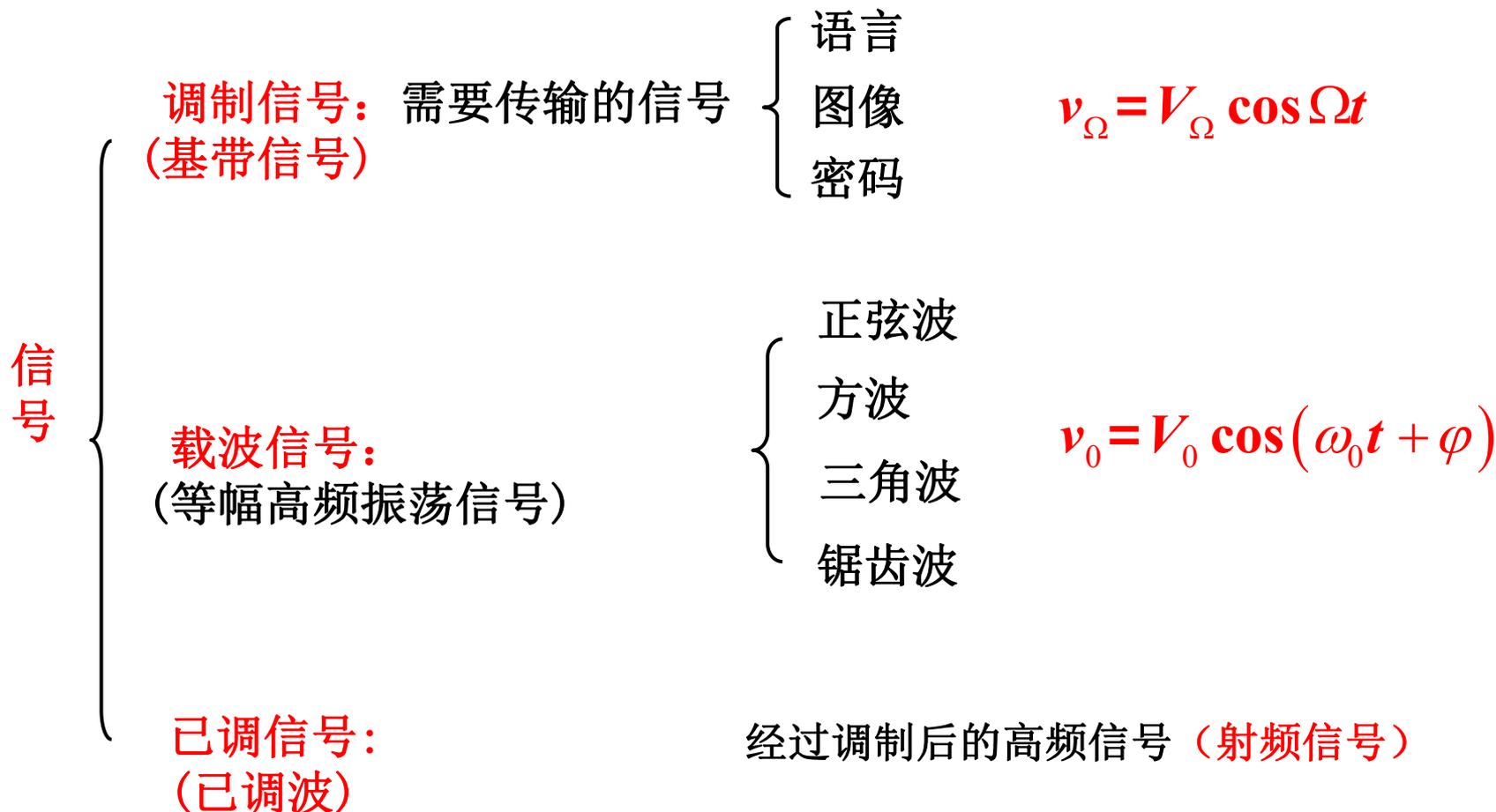
调制—定义、三要素

定义：调制信号改变载波参数（A、F、P）



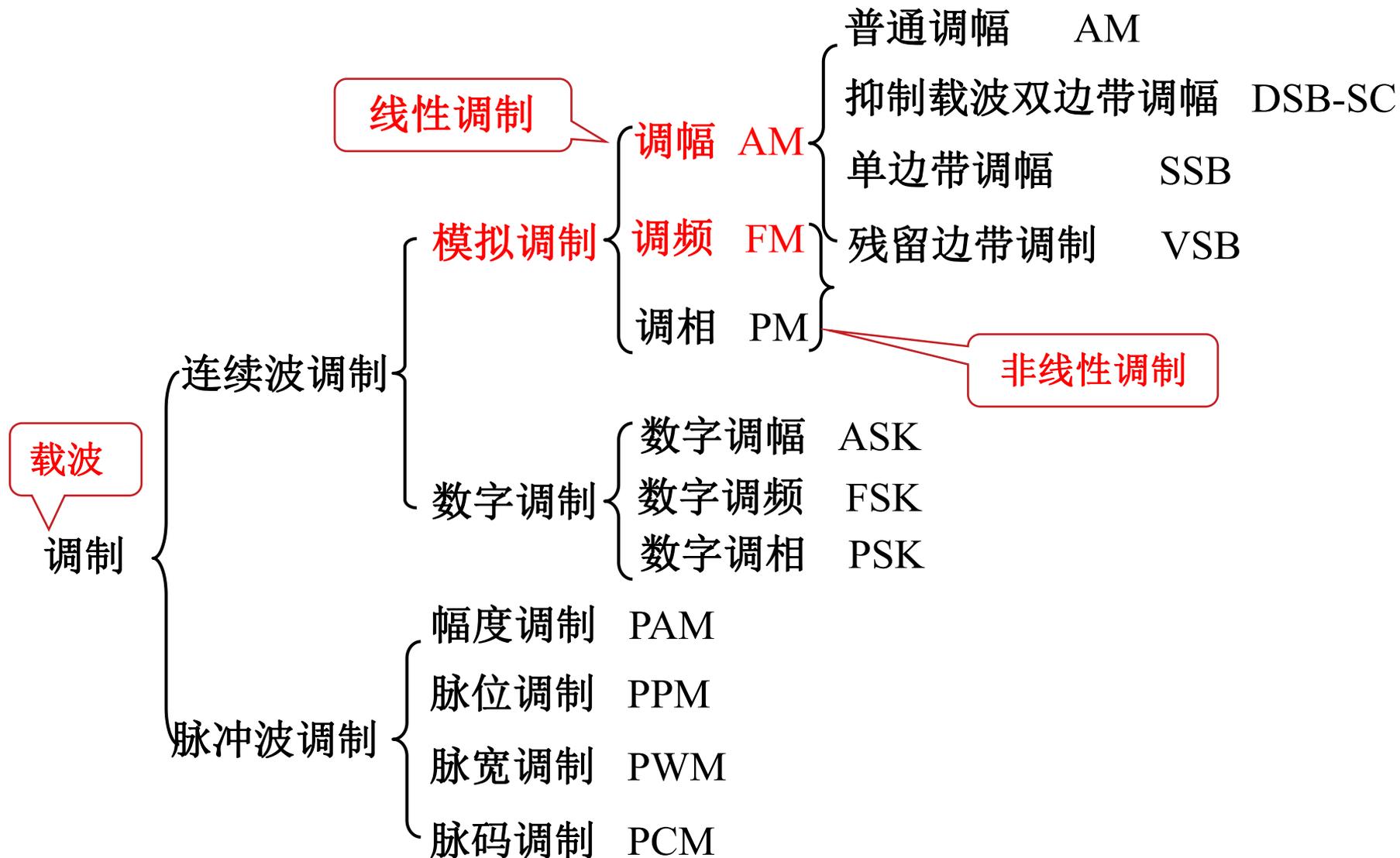
◆ 6.1 概述

调制过程含有的信号：



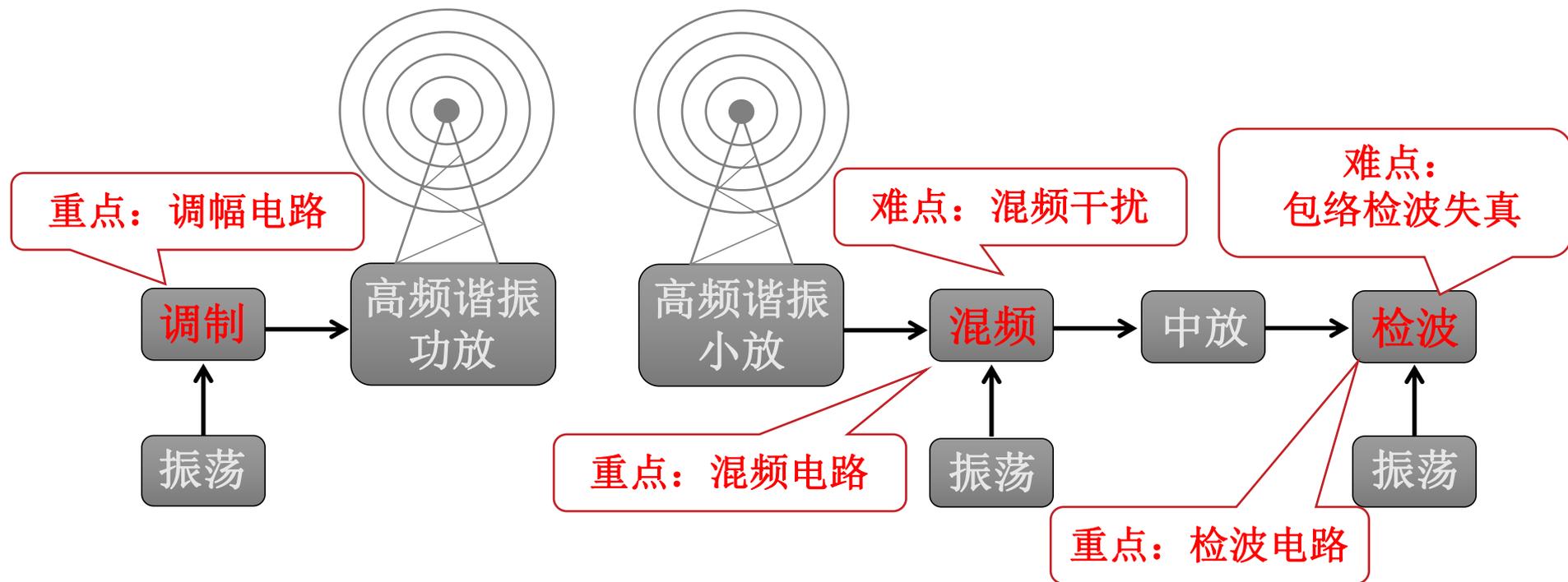
◆ 6.1 概述

调制—分类



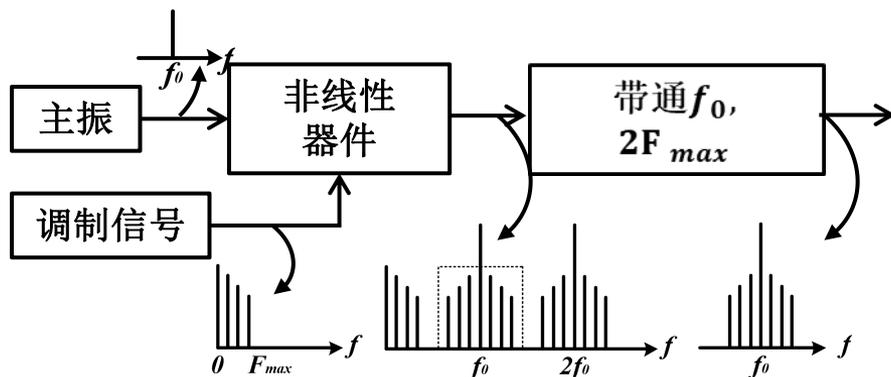
◆ 6.1 概述

调幅、检波、混频—本章重点、难点

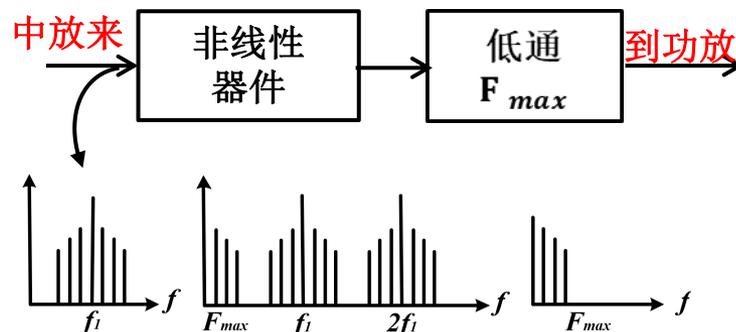


◆ 6.1 概述

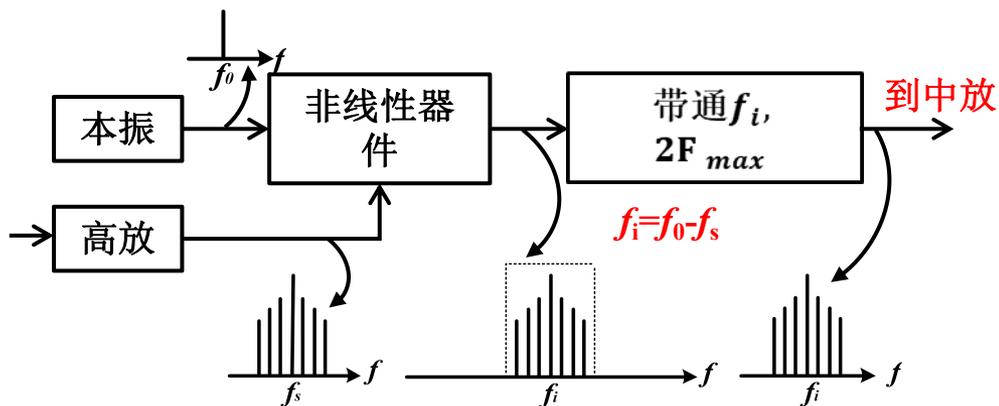
调制—调幅、检波、混频（频谱搬移）



(a)调幅原理



(c)检波原理



(b)混频原理

实现框图几乎相同
非线性器件(频率变换)+滤波器
频域：线性频谱搬移
时域： $\times \cos 2\pi f_0 t$

◆ 6.1 概述

3、调制的分类：

幅度调制(AM)

频率调制(FM)

相位调制(PM)

幅度调制：由调制信号去控制载波振幅，使已调信号的振幅随调制信号线性变化。

幅度调制分三种方式：

{ 普通调幅 (AM)
抑制载波双边带调幅 (DSB)
单边带调制 (SSB)

下面分别讨论幅度调制三种方式：

◆ 6.1 概述

二、普通调幅波（AM波）的数学表示式、波形及其频谱

1、定义：用需传送的信息（调制信号） $u_{\Omega}(t)$ 去控制高频载波 $u_c(t)$ 振荡电压的振幅，使其随调制信号 $u_{\Omega}(t)$ 线性关系变化。

2、普通调幅波的数学表示式

若载波信号： $u_c(t) = U_{cm} \cos \omega_c t$ 调制信号： $u_{\Omega}(t) = U_{\Omega m} \cos \Omega t$

根据定义调幅波的振幅为： $U_m'(t) = U_{cm} + k_{\alpha} u_{\Omega}(t)$

则普通调幅波的数学表示式为：

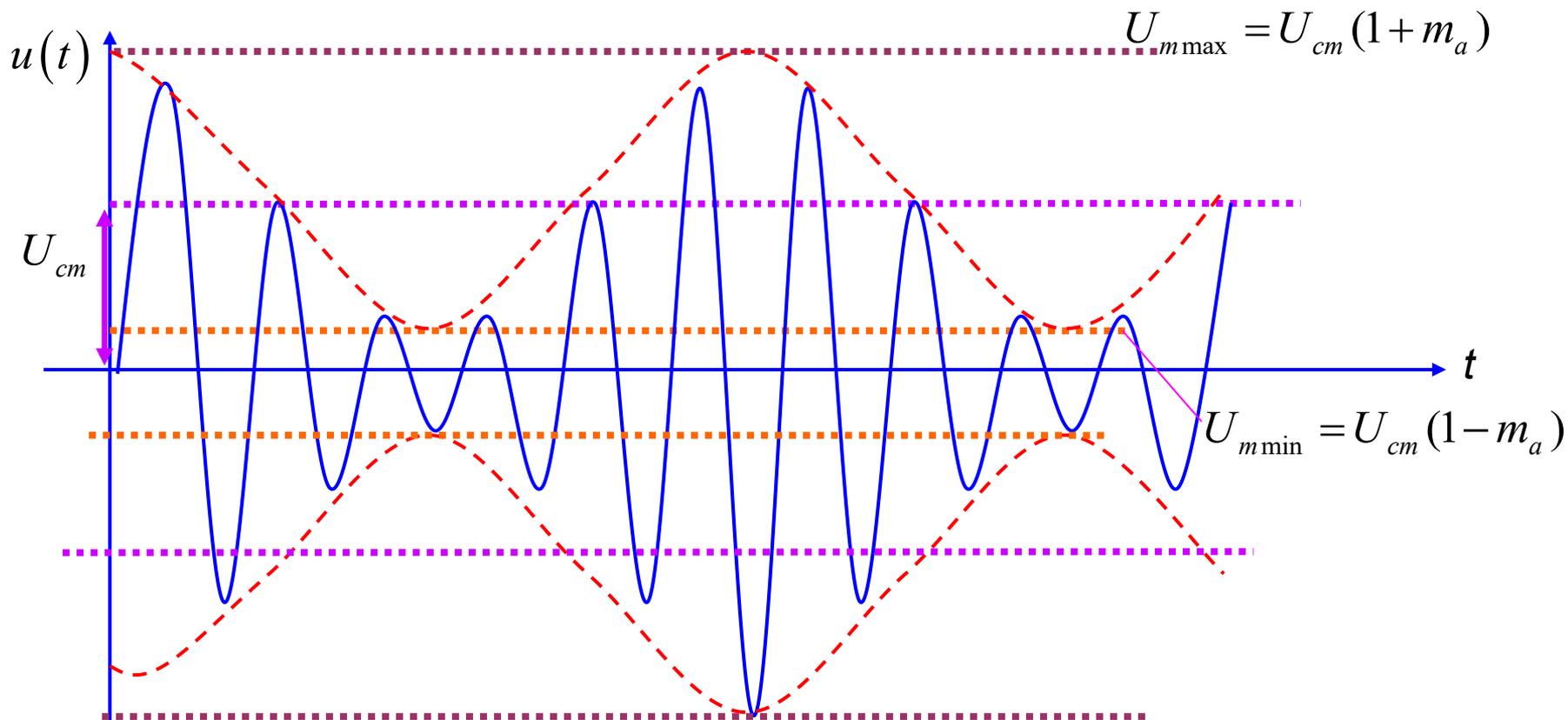
$$\begin{aligned} u(t) &= U_m'(t) \cos \omega_c t = [U_{cm} + k_{\alpha} u_{\Omega}(t)] \cos \omega_c t \\ &= [U_{cm} + k_{\alpha} U_{\Omega m} \cos \Omega t] \cos \omega_c t = U_{cm} \left[1 + \frac{k_{\alpha} U_{\Omega m}}{U_{cm}} \cos \Omega t \right] \cos \omega_c t \end{aligned}$$

$$u(t) = U_{cm} (1 + m_a \cos \Omega t) \cos \omega_c t$$

其中 $m_a = \frac{K_a U_{\Omega m}}{U_{cm}}$ 称为调幅指数（调幅度） k_{α} ：比例系数

◆ 6.1 概述

3、普通调幅波的波形 $u(t) = U_{cm}[1 + m_a \cos \Omega t] \cos \omega_c t$



调幅波的波形

包络线极值:
$$\begin{cases} U_{m \max} = U_{cm}(1 + m_a) \\ U_{m \min} = U_{cm}(1 - m_a) \end{cases} \Rightarrow m_a = \frac{U_{m \max} - U_{m \min}}{2U_{cm}}$$

◆ 6.1 概述

调幅指数

当 $m_a \leq 1$ 时，已调波振幅的包络形状与调制信号一样**不失真**调幅

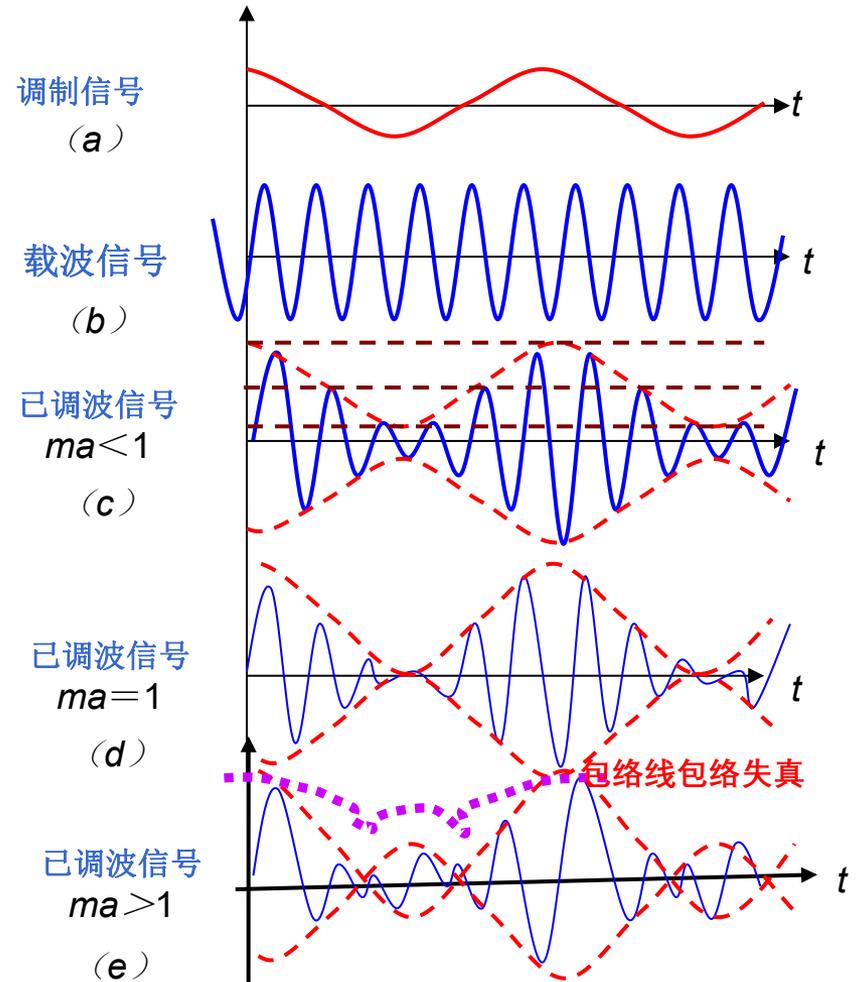
当 $m_a > 1$ 时，将产生过量调制如下图所示。包络形状会产生**严重失真**，必须尽力避免。

一般 m_a 值越大调幅深：

$M_a=0$ 时 未调幅

$M_a=1$ 时 最大调幅(百分之百)

$M_a>1$ 时 过调幅，包络失真，实际电路中必须避免



◆ 6.1 概述

4、普通调幅波的频谱

由数学表示式可得

$$\begin{aligned}u(t) &= U_{cm}(1 + m_a \cos \Omega t) \cos \omega_c t \\ &= U_{cm} \cos \omega_c t + \frac{1}{2} m_a U_{cm} \cos(\omega_c + \Omega)t + \frac{1}{2} m_a U_{cm} \cos(\omega_c - \Omega)t\end{aligned}$$

普通调幅波的频谱分类： $\left\{ \begin{array}{l} \text{单频调制} \\ \text{多频调制} \end{array} \right.$

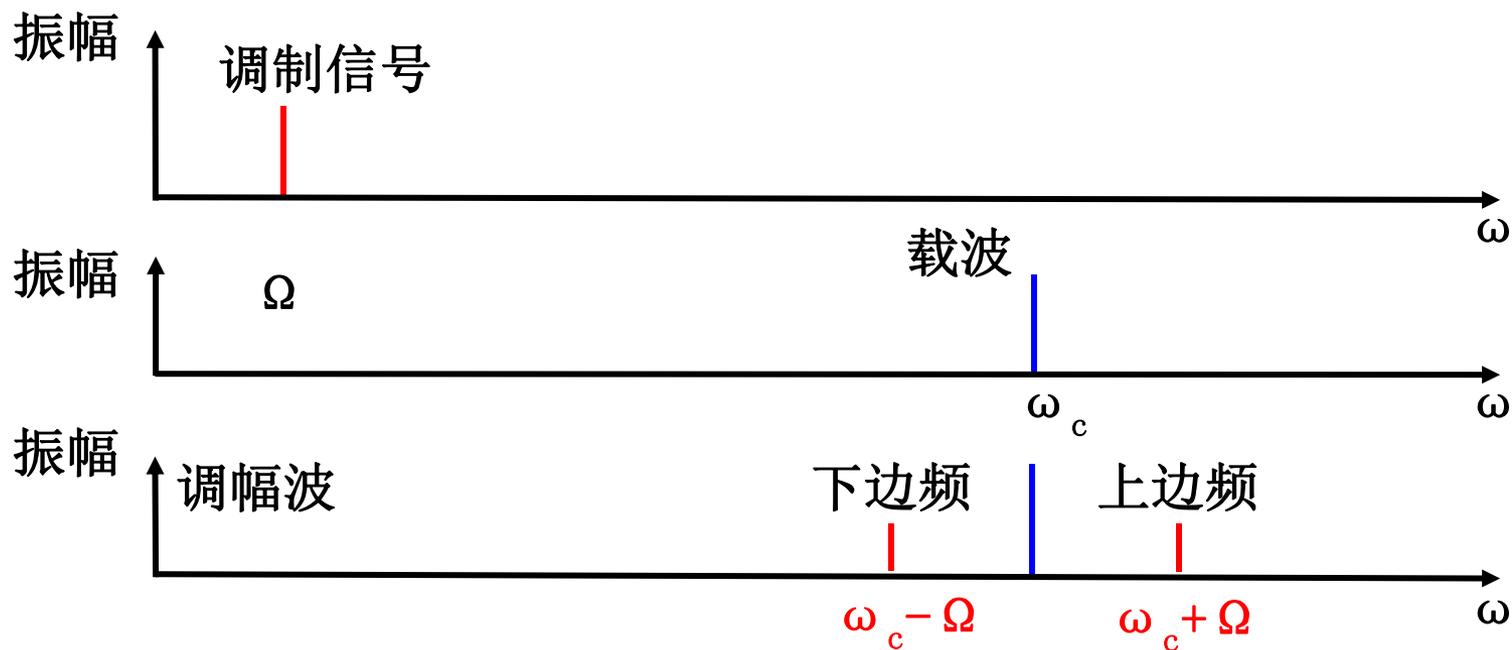
①单频调制的普通调幅波的频谱。

调幅波并不是一个简单的正弦波，包含有三个频率分量：

$\left\{ \begin{array}{l} \text{载波分量 } \omega_c: \text{不含传输信息} \\ \text{上边频分量 } (\omega_c + \Omega): \text{含传输信息} \\ \text{下边频分量 } (\omega_c - \Omega): \text{含传输信息} \end{array} \right.$

◆ 6.1 概述

单频调幅频谱图



单频调制的AM波的频谱： $\omega_c - \Omega$ 、 ω_c 、 $\omega_c + \Omega$

特点：

(a) 频谱线性搬移

(b) 调幅波带宽： $B = 2\left(\frac{\Omega}{2\pi}\right) = 2F$

◆ 6.1 概述

② 多音频调制的普通调幅波的频谱

设载波信号 $u_c(t) = U_{cm} \cos \omega_c t$,

调制信号 $u_{\Omega}(t) = U_{\Omega_1} \cos \Omega_1 t + U_{\Omega_2} \cos \Omega_2 t + \dots + U_{\Omega_n} \cos \Omega_n t$

$$\begin{aligned} \text{则 } U_m'(t) &= U_{cm} + k_{\alpha} [U_{\Omega_1} \cos \Omega_1 t + U_{\Omega_2} \cos \Omega_2 t + \dots + U_{\Omega_n} \cos \Omega_n t] \\ &= U_{cm} [1 + m_{a1} \cos \Omega_1 t + m_{a2} \cos \Omega_2 t + \dots + m_{an} \cos \Omega_n t] \end{aligned}$$

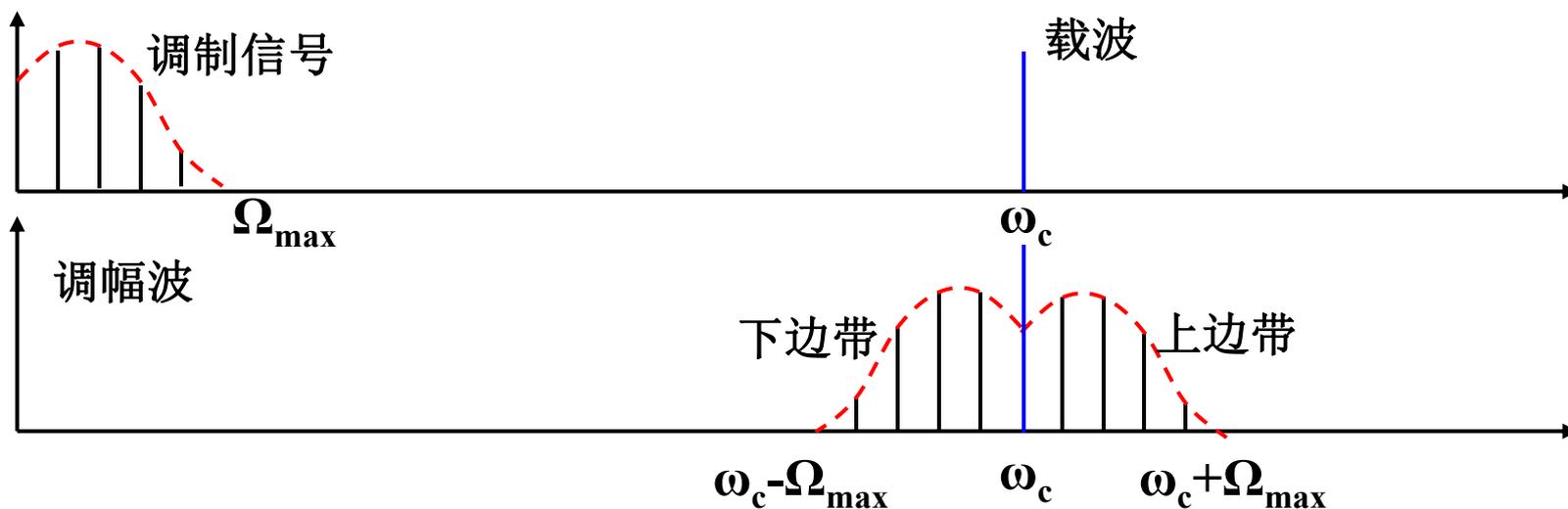
$$\begin{aligned} u(t) &= U_{cm} [1 + m_{a1} \cos \Omega_1 t + m_{a2} \cos \Omega_2 t + \dots + m_{an} \cos \Omega_n t] \cos \omega_c t \\ &= U_{cm} \cos \omega_c t + \frac{U_{cm}}{2} \sum_{i=1}^n m_{ai} [\cos(\omega_c + \Omega_i)t + \cos(\omega_c - \Omega_i)t] \end{aligned}$$

同样含有三部分频率成份

{	载波分量: ω_c	不含信息
	上边带($\omega_c + \Omega_n$)	含信息
	下边带($\omega_c - \Omega_n$)	含信息

◆ 6.1 概述

信号带宽 $B = 2F_{\max}$



多音频调制的普通调幅波的频谱

◆ 6.1 概述

结论

- (1) 调幅过程是一种线性频谱搬移过程。经调制后，调制信号的频谱被搬移到载频的两旁成为上、下边频带。相当于“载波将调制信号装载在里面”。
- (2) 用单音频调制的调幅波含有三个频率分量，即：

	载频	上旁频/上边带	下旁频/下边带
频率	ω_0	$\omega_0 + \Omega$	$\omega_0 - \Omega$
振幅	V_0	$\frac{1}{2} m_a V_0$	$\frac{1}{2} m_a V_0$

- (3) 调幅波的频带宽度为调制信号最高频率的两倍，
即 $BW = 2F_{\max}$

◆ 6.1 概述

例1： 设某一广播电台的信号电压 $u(t) = 20(1 + 0.3 \cos 6280t) \cos 6.33 \times 10^6 t (mV)$ 。问：此电台的频率是多少？
调制信号频率是多少？

解： 电台的角频率为 $\omega_c = 6.33 \times 10^6 (rad / s)$

$$\text{频率为 } f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = 1.007 (MHz)$$

调制信号的角频率为 $\Omega = 6280 (rad / s)$

$$\text{频率为 } F = \frac{\Omega}{2\pi} = 1000 (Hz)$$

◆ 6.1 概述

例2:

$$u(t) = 25(1 + 0.7 \cos 10000 \pi t - 0.3 \cos 20000 \pi t) \cos 2 \pi \times 10^6 t (V)$$

求调幅波 $u(t)$ 所包含的各分量的频率和振幅。画出其频谱图。

分析:

$$\begin{aligned} u(t) &= 25(1 + 0.7 \cos 10000 \pi t - 0.3 \cos 20000 \pi t) \cos 2 \pi \times 10^6 t \\ &= 25 \cos 2 \pi \times 10^6 t \\ &\quad + 8.75 [\cos(2 \pi \times 10^6 + 10000 \pi) t + \cos(2 \pi \times 10^6 - 10000 \pi) t] \\ &\quad - 3.75 [\cos(2 \pi \times 10^6 + 20000 \pi) t + \cos(2 \pi \times 10^6 - 20000 \pi) t] \end{aligned}$$

解:

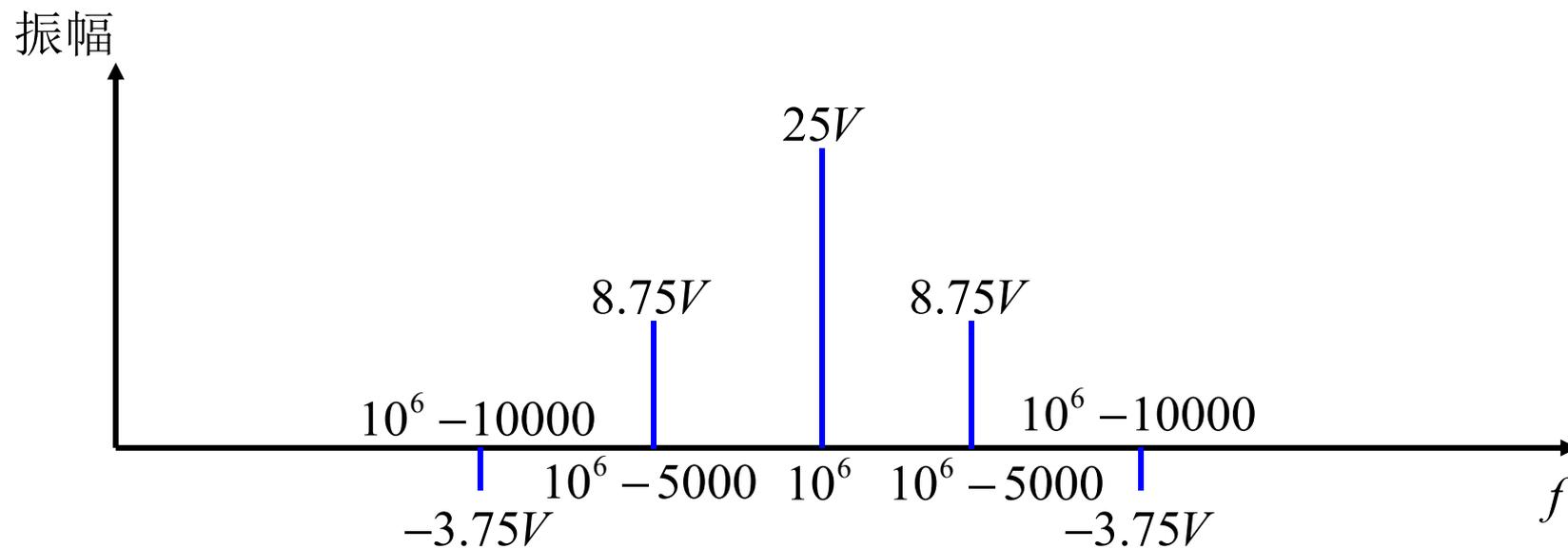
载波频率为 $f_c = 10^6 \text{ Hz}$, 振幅为 $25V$

第一对边频频率为 $10^6 \pm 5000$, 振幅为 $8.75V$

第二对边频频率为 $10^6 \pm 10000$, 振幅为 $-3.75V$

◆ 6.1 概述

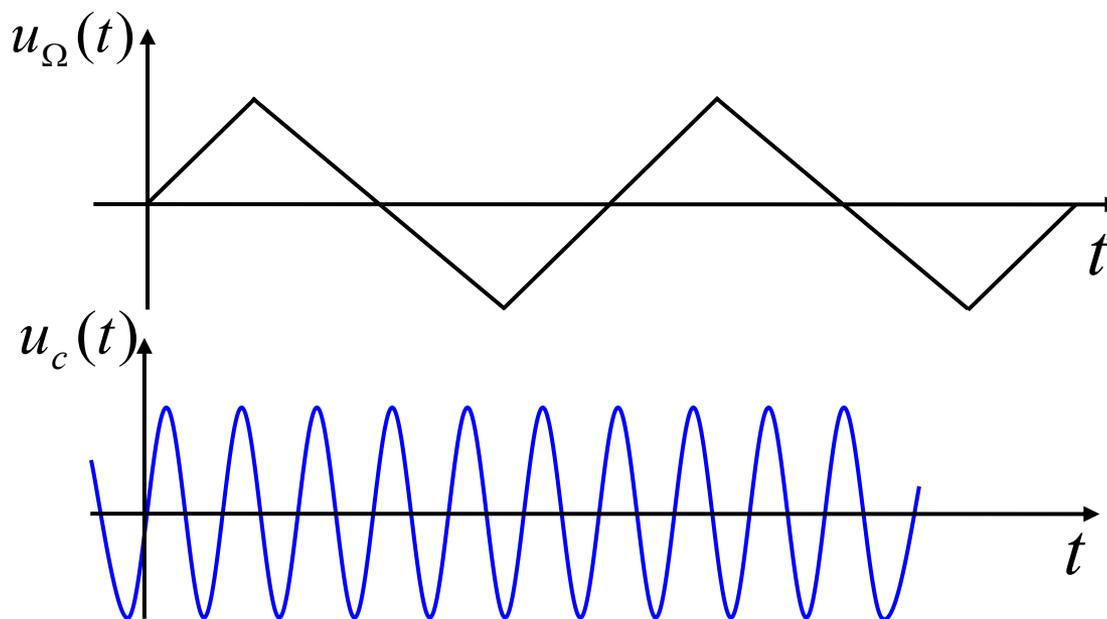
其频谱图



◆ 6.1 概述

课堂作业（10分钟）：

已知载波电压 $u_c(t) = U_{cm} \cos \omega_c t$ ，调制信号 $u_\Omega(t)$ 为三角波，两者波形如图所示，画出 $m_a = 0.5$ 普通调幅波 $u(t)$ 的波形。

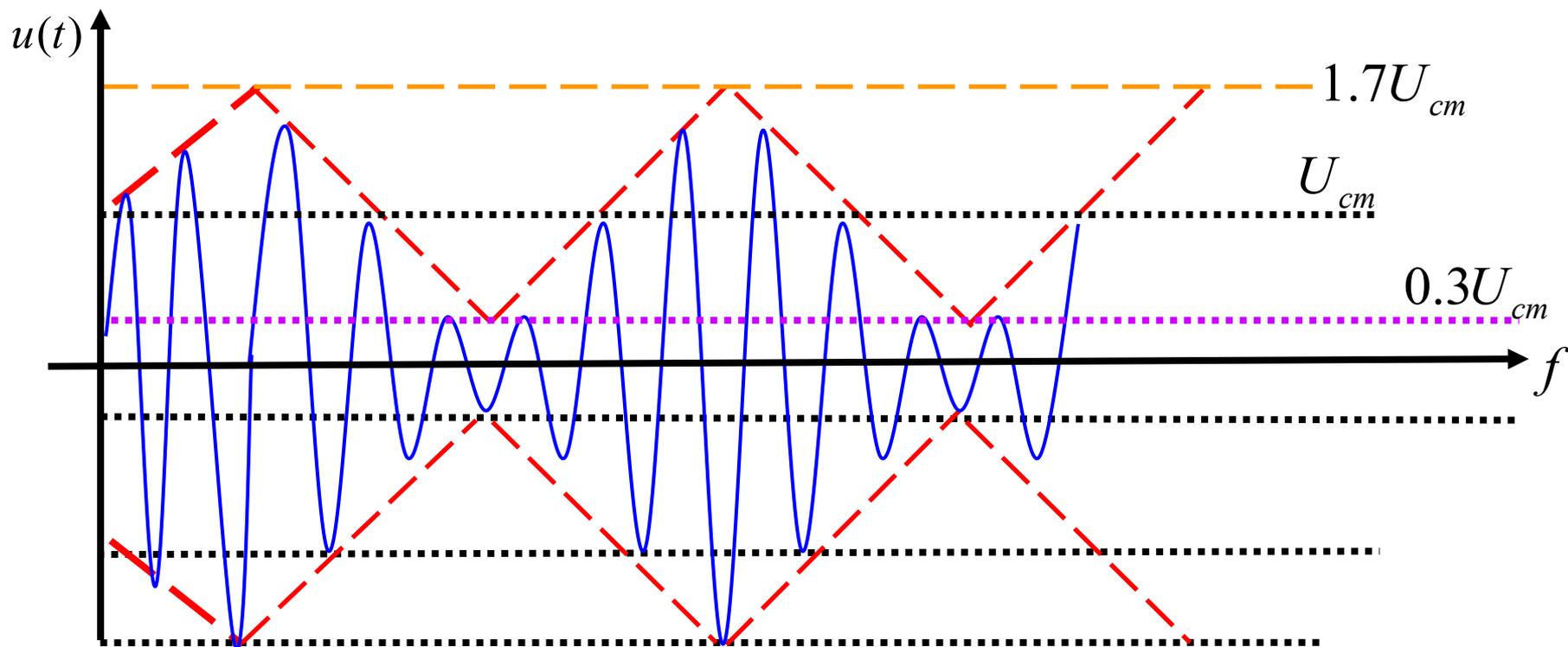


评分：包络线形状1分、包络线起点1分、包络线幅值1分，波形的密度1分，波形的起点1分。

◆ 6.1 概述

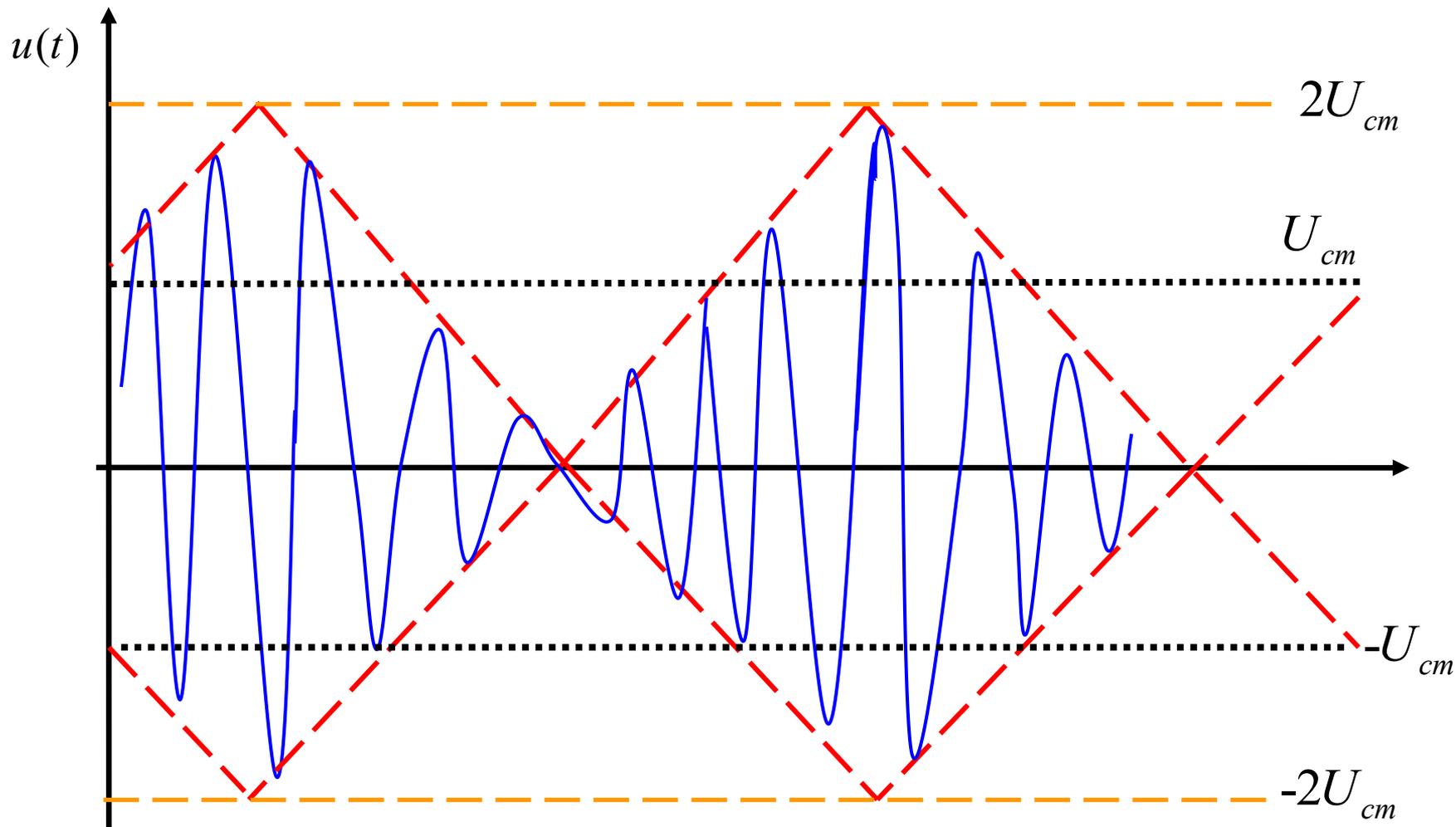
画图方法：先求出调幅波包络线的最大值和最小值，由此画出包络线，然后画出调幅波波形。**注意已调波的起始点。**

解： (1) $m_a = 0.7 \Rightarrow \begin{cases} U_{m \max} = U_{cm} (1 + m_a) = 1.7U_{cm} \\ U_{m \min} = U_{cm} (1 - m_a) = 0.3U_{cm} \end{cases}$



◆◆ 6.1 概述

$$(2)m_a = 1 \Rightarrow \begin{cases} U_{m\max} = U_{cm}(1+m_a) = 2U_{cm} \\ U_{m\min} = U_{cm}(1-m_a) = 0 \end{cases}$$



◆ 6.1 概述

三、普通调幅波的功率关系

1、普通调幅波中各频率分量之间的功率关系

将普通调幅波电压加在电阻R两端，电阻R上消耗的各频率分量对应的功率可表示为：

①R上消耗的载波功率
$$P_{OT} = \frac{1}{2} \frac{U_{cm}^2}{R}$$

②每一边频功率（上、下边带的平均功率）

$$P_{\omega_c + \Omega} = P_{\omega_c - \Omega} = \frac{1}{2} \left(\frac{m_a U_{cm}}{2} \right)^2 \frac{1}{R} = \frac{1}{4} m_a^2 P_{OT}$$

③边频功率：

$$P_{\omega_c \pm \Omega} = P_{\omega_c + \Omega} + P_{\omega_c - \Omega} = \frac{m_a^2}{2} P_{OT}$$

◆ 6.1 概述

④调制一周内的平均总功率 $P_{oav} = P_{oT} + P_{\omega_c + \Omega} + P_{\omega_c - \Omega} = \left(1 + \frac{m_a^2}{2}\right) P_{oT}$

⑤效率：
$$\eta = \frac{\text{边频功率}}{\text{总功率}} = \frac{P_{\omega_c + \Omega} + P_{\omega_c - \Omega}}{P_{oav}} = \frac{\frac{m_a^2}{2}}{1 + \frac{m_a^2}{2}}$$

当 $m_a = 1$, $\eta = 0.33$

当 $m_a < 1$, $\eta < 0.33$

当 $m_a > 1$, $\eta > 0.33$, 但失真

2、普通调幅波的特点

①普通调幅波中载波分量占有的功率较大，而含有信息的上、下边频分量占有的功率较小。

②从能量观点看，普通调幅波进行传送，不含信息的载波功率过大，是一种很大的浪费。这是普通调幅波本身固有的。但AM波调制方便，解调方便，便于接收。

◆ 6.1 概述

四、抑制载波的双边带调幅信号和单边带信号

1、抑制载波的双边带调幅波（DSB）

①数学表示式

在AM调制过程中，如果将载波分量抑制就形成抑制载波的双边带信号，简称双边带信号，它可以用载波和调制信号直接相乘得到，即：

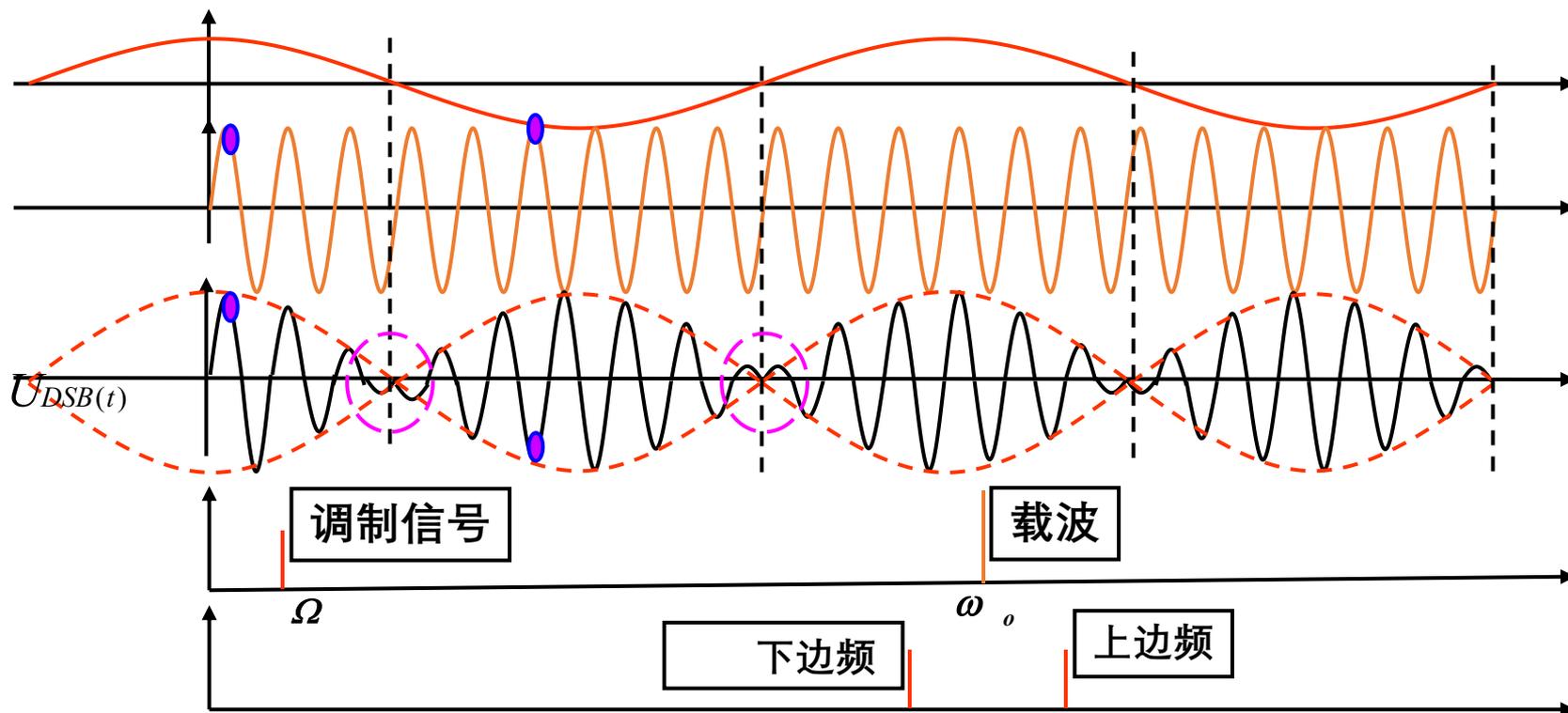
$$\begin{aligned}u(t) &= u_{\Omega}(t)u_c(t) = U_{\Omega m} \cos \Omega t \cdot U_{cm} \cos \omega_c t \\ &= \frac{1}{2} U_{\Omega m} U_{cm} [\cos(\omega_c + \Omega)t + \cos(\omega_c - \Omega)t]\end{aligned}$$

② 波形与频谱

◆ 6.1 概述

三、抑制载波的双边带调幅信号和单边带信号

② 波形与频谱



◆ 6.1 概述

三、抑制载波的双边带调幅信号和单边带信号

波形特点

- (1) DSB信号的包络正比于调制信号 $|U_{\Omega m} \cos \Omega t|$
- (2) DSB信号载波的相位反映了调制信号的极性，即在调制信号负半周时，已调波高频与原载波反相。因此严格地说，DSB信号已非单纯的振幅调制信号，而是既调幅又调相的信号。
- (3) DSB波的频谱成份中抑制了载波分量，全部功率为边带占有，功率利用率高于AM波。
- (4) 占用频带 $B_w = 2\Omega_{\max} = 2F_{\max}$

◆ 6.1 概述

2、单边带调幅波 (SSB)

①数学表示式

$$u(t) = U'_m \cos(\omega_c + \Omega)t \text{ 或 } u(t) = U'_m \cos(\omega_c - \Omega)t$$

②频谱

单频调制的单边带调幅波的频谱为 $\omega_c + \Omega$ 或 $\omega_c - \Omega$

③特点

频带只有双边带调幅波的一半，其频带利用率高。调幅又调频的信号全部功率都含有信息，功率有效利用率高。

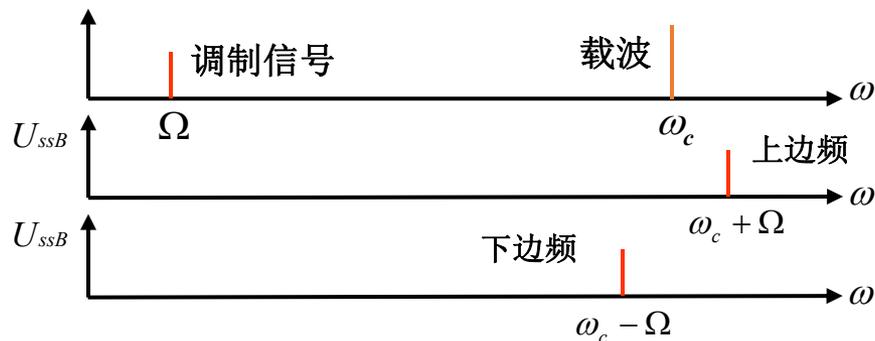
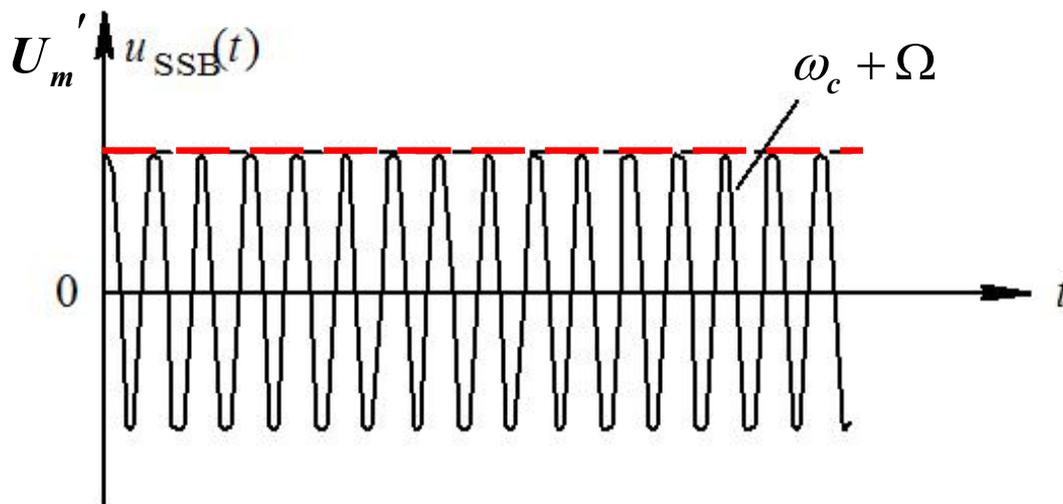
④频带宽度 $B=F$

◆ 6.1 概述

波形与频谱

若调制信号为单一频率，则单边带调幅波为等幅波。

$$u(t) = U_m' \cos(\omega_c + \Omega)t \text{ 或 } u(t) = U_m' \cos(\omega_c - \Omega)t$$



◆ 6.1 概述

例5: 试问下面三个电压各代表什么信号，画出它们的波形图和振幅频谱图。

$$(1) u(t) = (1 + 0.3 \cos \Omega t) \cos \omega_c t$$

$$(2) u(t) = \cos \Omega t \cos \omega_c t,$$

$$(3) u(t) = \cos(\omega_c + \Omega)t$$

解: 从表达式可看出，各电压分别为

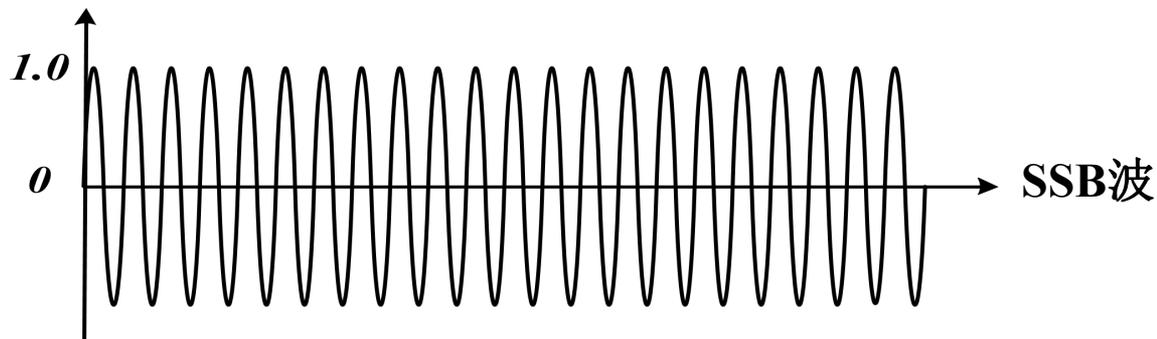
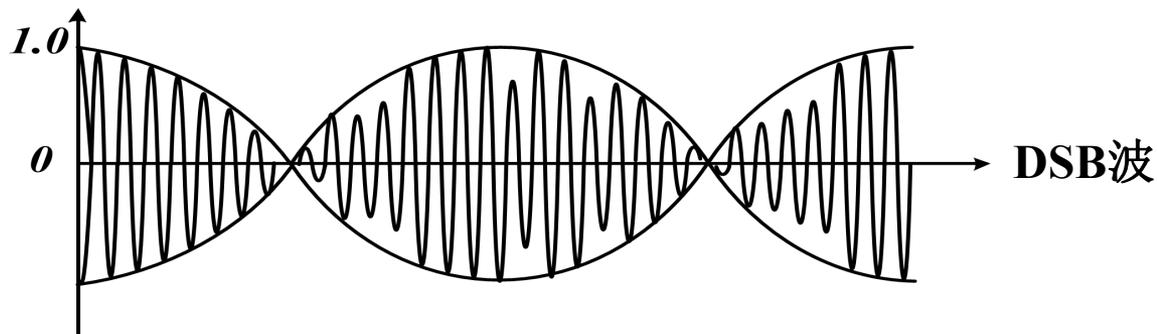
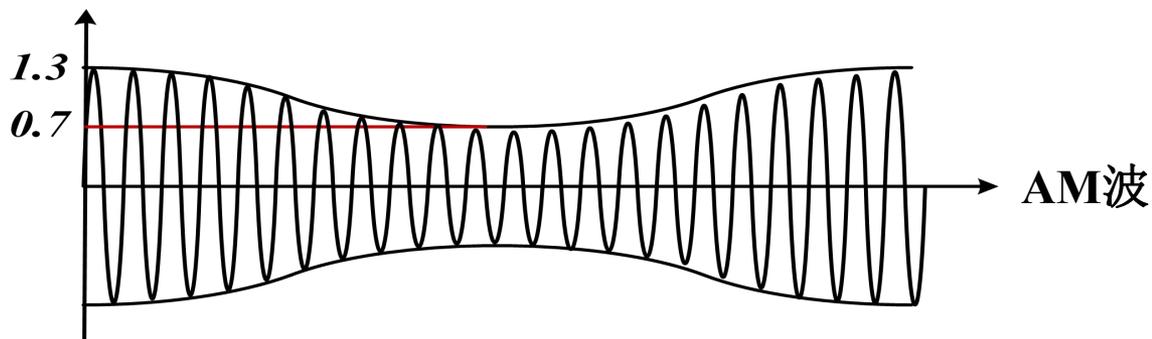
(1) 为普通调幅波 (AM)

(2) 为双边带调幅 (DSB)

(3) 为单边带调幅 (DSB)

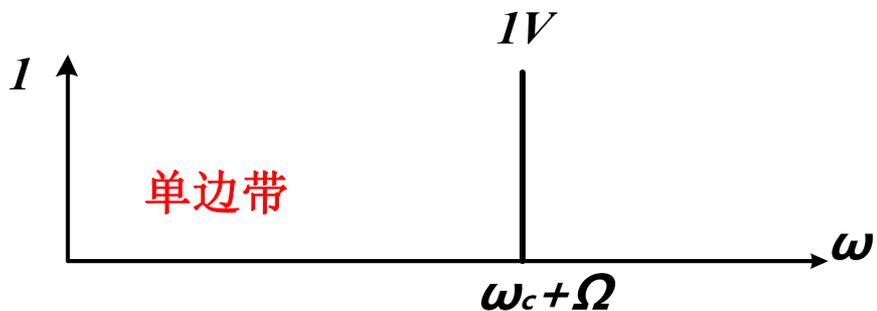
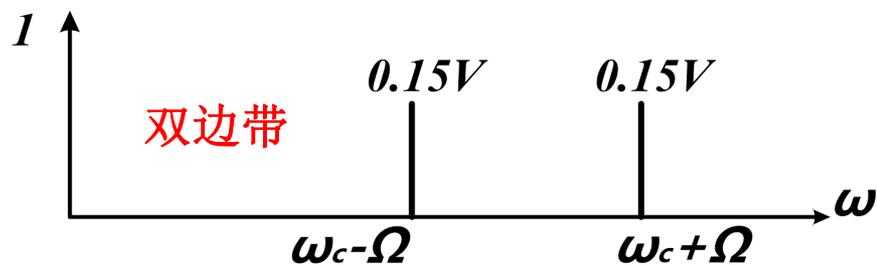
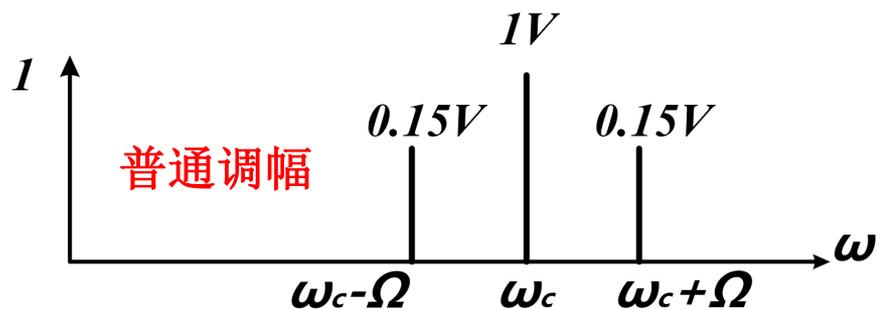
◆ 6.1 概述

2. 波形分别为:



◆ 6.1 概述

3、频谱图分别为



◆ 6.1 概述

五、振幅调制电路的功能

$$\left\{ \begin{array}{l} AM \text{ 信号: } u_{AM}(t) = u_{cm}(1 + m_a \cos \Omega t) \cos \omega_c t \\ DSB \text{ 信号: } u_{DSB}(t) = k u_{\Omega} m u_{cm} \cos \Omega t \cos \omega_c t \\ SSB \text{ 信号: } u_{SSB}(t) = u'_m \cos(\omega_c + \Omega)t \text{ 或} \\ u_{SSB}(t) = u'_m \cos(\omega_c - \Omega)t \quad \text{调幅, 调频} \end{array} \right.$$

三种信号都有一个调制信号和载波的乘积项，所以振幅调制电路的实现是以乘法器为核心的频谱线性搬移电路。

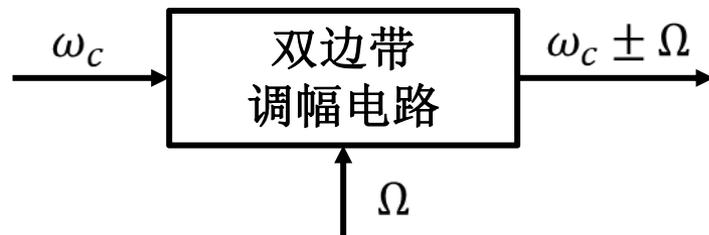
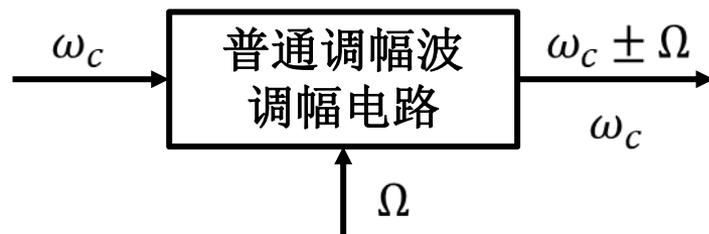
1、振幅调制电路的功能

是将输入的调制信号和载波信号通过电路变换成高频调幅信号输出。

2、功能的表示

当载波为 $u_c(t) = U_{cm} \cos \omega_c t$ 调制信号为 $u_{\Omega}(t) = U_{\Omega m} \cos \Omega t$ 时，三种振幅调制电路的功能可以用频谱表示，如右图所示。

纯调幅
调幅, 调相



◆ 6.1 概述

六、振幅调制电路的分类及要求

1、分类：

低电平调幅：**先调制后功放**，主要用于DSB、SSB以及FM信号。

高电平调幅：**功放和调制同时进行**，主要用于AM**信号**。

2、要求

① 低电平调幅是在低功率电平级进行振幅调制，输出功率和效率不是主要指标。**重点是提高调制的线性，减小不需要的频率分量的产生和提高滤波性能。**

② 高电平调幅是直接产生满足发射机输出功率要求的已调波。利用丙类功放改变来实现调幅。**其优点是效率高。设计时必须兼顾输出功率、效率和调制线性的要求。**

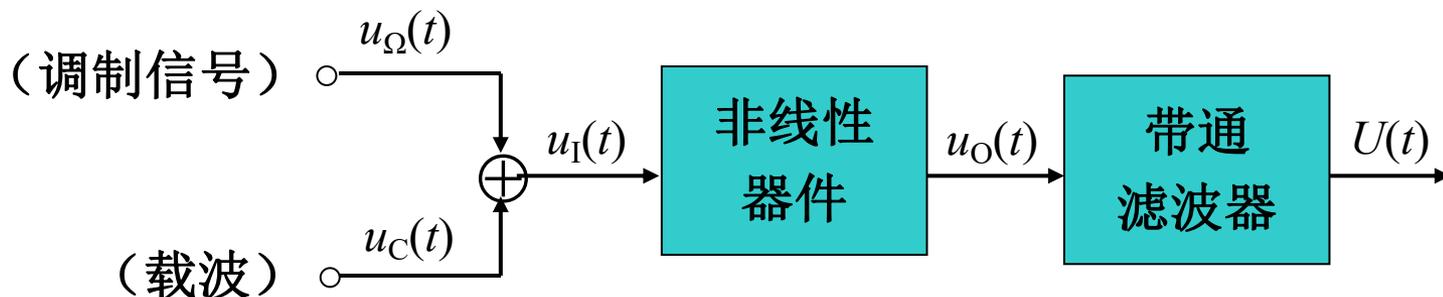
◆ 6.1 概述

七、振幅调制电路的基本组成

(一) 振幅调制电路的输入频谱为 ω 和 Ω , 而输出频谱中必须有新的频率分量 $\omega \pm \Omega$ 。因而调幅电路**必须是非线性器件组成**, 其特性必须含有载波信号与调制信号相乘积项。

(二) 集成模拟乘法器能实现载波信号和调制信号的相乘, 是用于调幅电路的理想非线性器件。

(三) 具有平方率特性的二极管或场效应管, 利用载波信号与调制信号相加 $u_c(t) + u_\Omega(t)$, 经二极管特性的平方项 $[u_c(t) + u_\Omega(t)]^2$ 产生的乘项中的 $u_c(t)$ 、 $u_\Omega(t)$ 可产生 $\omega \pm \Omega$ 实现调幅。

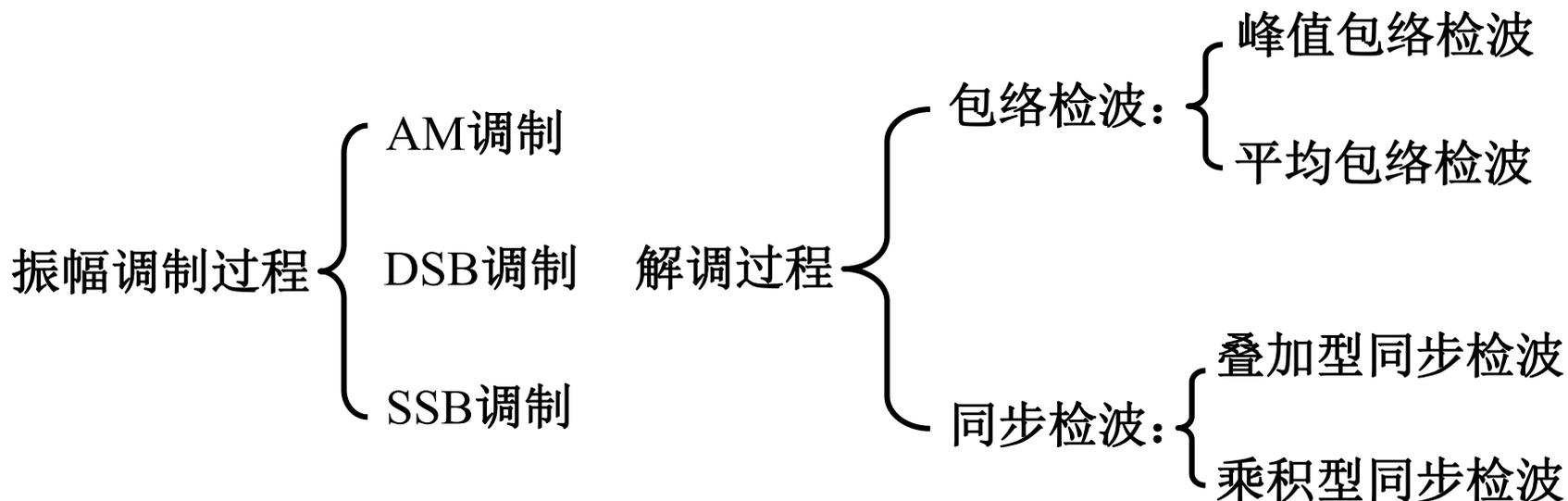


一般来说, 振幅调制电路由**输入回路、非线性器件和带通滤波器**三部分组成。

◆ 6.1 概述

八、振幅调制与解调

解调是调制的逆过程，是从高频已调波中恢复出原低频调制信号的过程。从频谱上看，解调也是一种信号频谱的线性搬移过程，是将高频端的信号频谱搬移到低频端，解调过程是和调制过程相对应的，不同的调制方式对应于不同的解调。



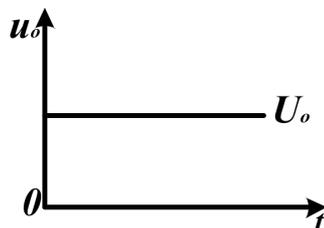
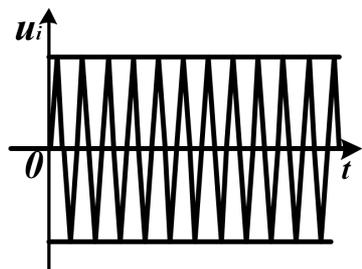
◆ 6.1 概述

八、振幅调制与解调

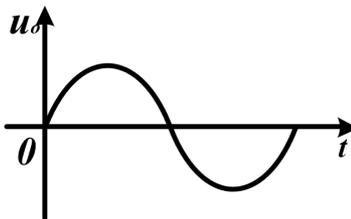
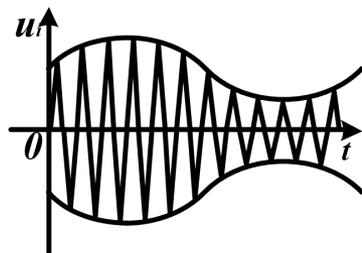
一)、检波电路的功能:

从调幅波中**不失真**地解调出原调制信号。通常将调幅解调电路称为振幅检波器。

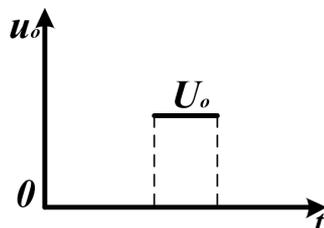
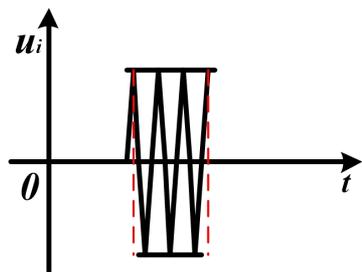
1、输入输出波形表示形式



输入为高频等幅波时，检波器输出为直流电压。



输入为普通调幅波时，检波器输出角频率为 Ω 的正弦波。

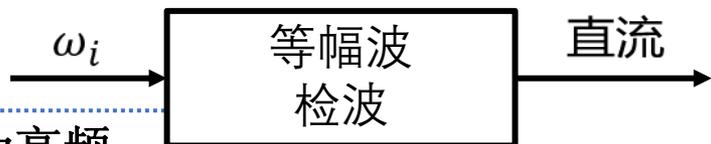


输入为脉冲调制的普通调幅波，输出为脉冲波。

◆ 6.1 概述

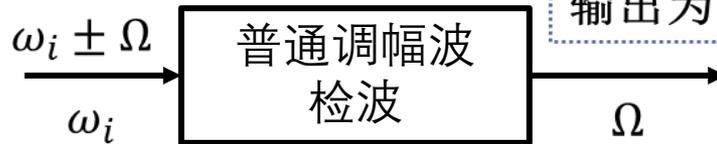
八、振幅调制与解调

2、输入输出频谱表示形式



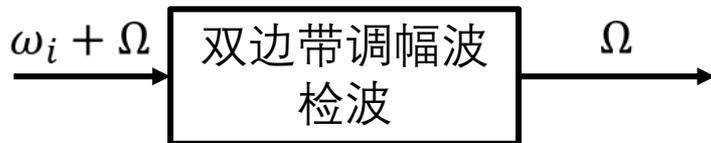
(a)输入为高频等幅波,输入频谱为 ω_i ,输出为直流。

(a)



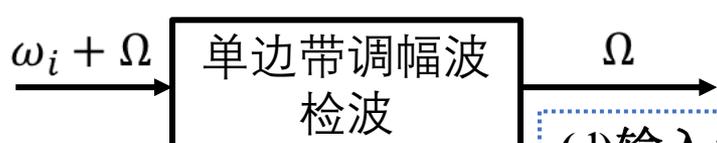
(b)输入为普通调幅波,输入频谱为 ω_i 、 $\omega_i \pm \Omega$ 输出为 Ω 。

(b)



(c)输入为双边带调幅波,输入频谱为 $\omega_i \pm \Omega$,输出为 Ω 。

(c)



(d)输入为单边带调幅波,输入频谱为 $\omega_i + \Omega$ 或 $\omega_i - \Omega$ 输出为 Ω 。

(d)

其中(a) (b)中可直接对输入信号进行非线性变换获得所需信号,而(c)(d)需外加本地载波信号。

◆ 检波的过程也是频谱的搬移过程,将频谱由**载频附近搬移到低频段**。

◆ 6.1 概述

八、振幅调制与解调

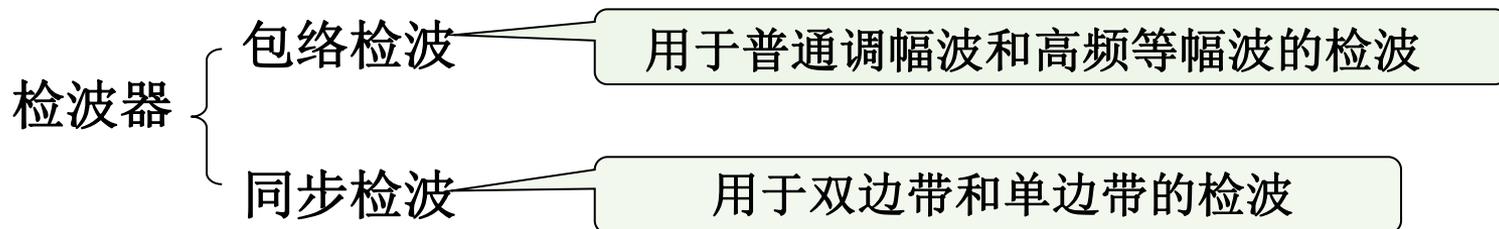
二)、检波电路的组成

检波电路由**输入回路**、**非线性器件**和**低通滤波器**三部分组成。



三)、检波电路的分类

根据输入调幅信号的不同特点可分为两大类：



由于**DSB和SSB信号的包络**不同于调制信号，**不能用包络检波器**，**只能用同步检波器**，但需注意同步检波过程中，为了正常解调，必须恢复载波信号，而所恢复的载波必须与原调制载波同步（即同频同相）。

◆ 6.1 概述

小结

- 调幅信号的定义、数学表达式、波形、频谱和功率等基本特征。
- 振幅调制电路的基本组成、功能

◆ 6.1 概述

复习习题

- 1. 什么是调制？有哪几种调制方法？
- 2. 什么是调幅指数？最大值为多少？调制度的大小与调幅的强弱关系如何？
- 3. AM已调信号包括哪三部分？
- 4. DSB（双边带信号）的包络是随什么信号变化的？与载波信号的相位关系如何？
- 5. 某调幅广播的载波频率为1600KHz，音频调制信号频率为110Hz-4KHz，则此电台信号所占的频带宽度为多少？
- 6. 试比较AM信号、DSB（双边带信号）和单边带（SSB）三种调制方式频谱的和功率利用效率。
- 7. 单边带通信的优点和缺点分别有哪些？

◆ 6.1 概述

作业

第二版P226. 6-1 、 6-5

END