



西安电子科技大学

通信工程学院

通信原理

任光亮

glren@mail.xidian.edu.cn

本文件仅供西安电子科技大学通信原理课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

西安电子科技大学 通信工程学院
2020年9月





第4章 模拟调制系统

西安电子科技大学

通信工程学院

本章主要内容:

- ★调制的目的、定义和分类
- ★幅度调制的原理和抗噪声性能
- ★角调制的原理
- ★频分复用的基本原理

本章作业: 1, 2, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 17



第4章 模拟调制系统

西安电子科技大学

通信工程学院

一、调制的目的

- 1、使信号适于在信道中传输。
- 2、实现信道的多路复用。
- 3、改善系统的抗噪声性能。

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

二、调制的定义

用调制信号控制高频载波的某个或某几个参量，使它随调制信号而变化。

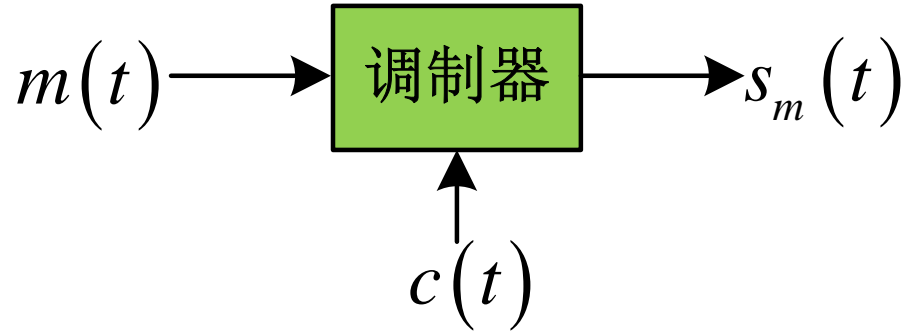


第4章 模拟调制系统

西安电子科技大学

通信工程学院

三、调制的分类



1、按载波形式分

连续波调制

脉冲调制

2、按调制信号形式分

模拟调制

数字调制

3、按已调信号频谱特性分

线性调制

非线性调制

本文件仅供西安电子科技大学通信工程学院课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

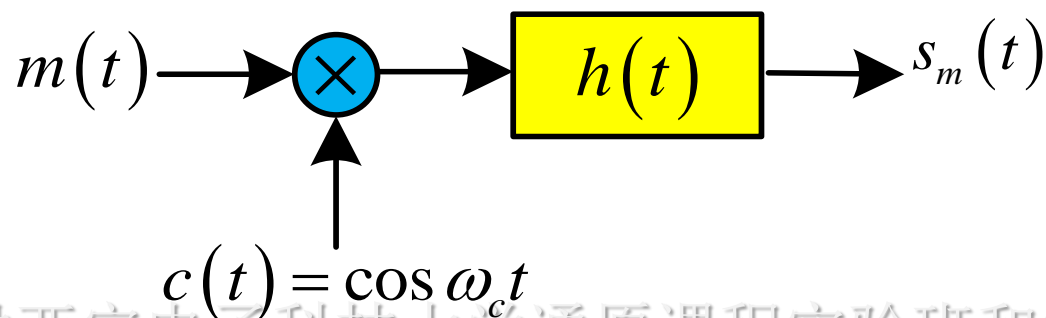


4.1 幅度调制（线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

一、幅度调制器的一般模型



本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

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

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

注：符合线性调制的定义。

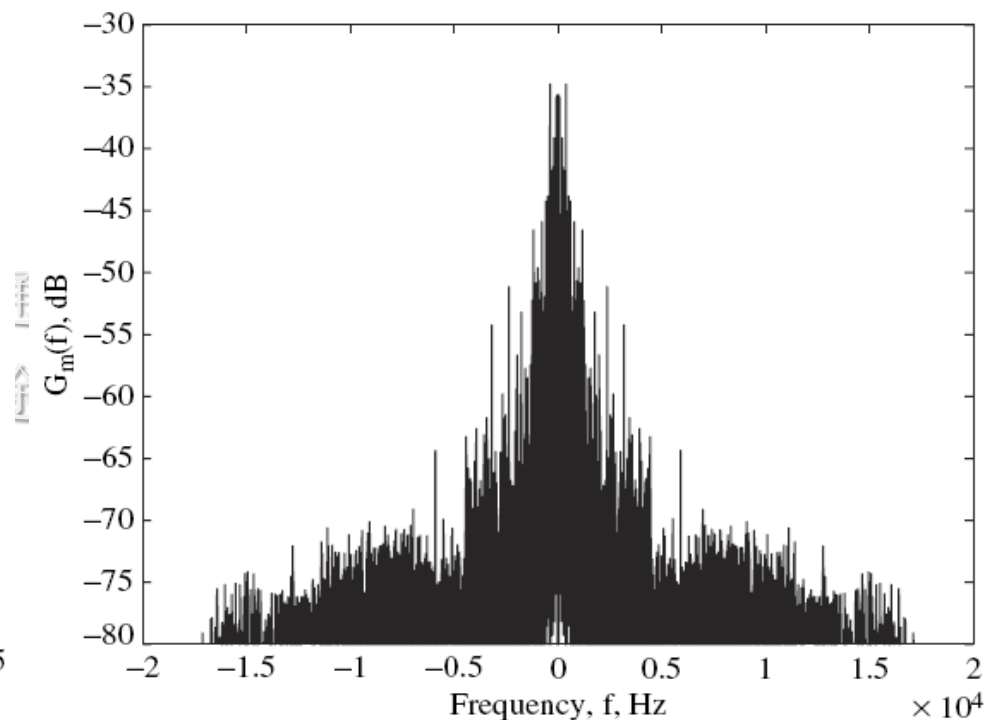
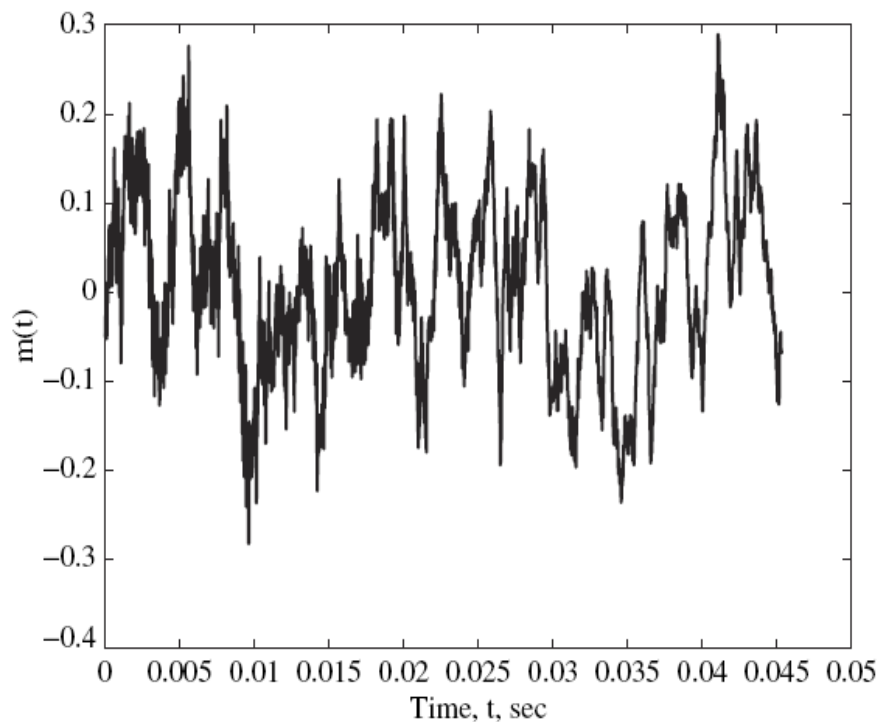


4.1 幅度调制（线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

一、幅度调制器的一般模型



$m(t)$ 波形和功率谱

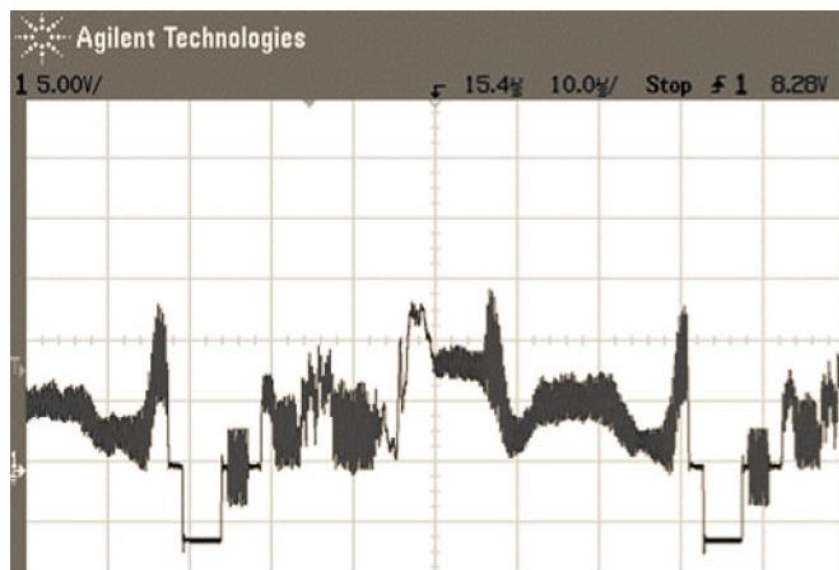


4.1 幅度调制（线性调制）的原理

西安电子科技大学

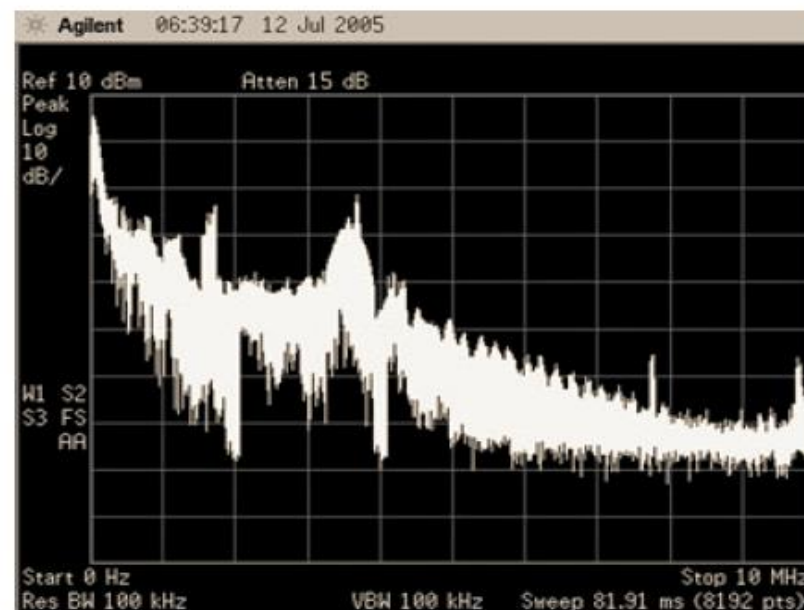
通信工程学院

一、幅度调制器的一般模型



(a) Measured time waveform

通原
途。



(b) Measured power spectrum

$m(t)$ 波形和功率谱

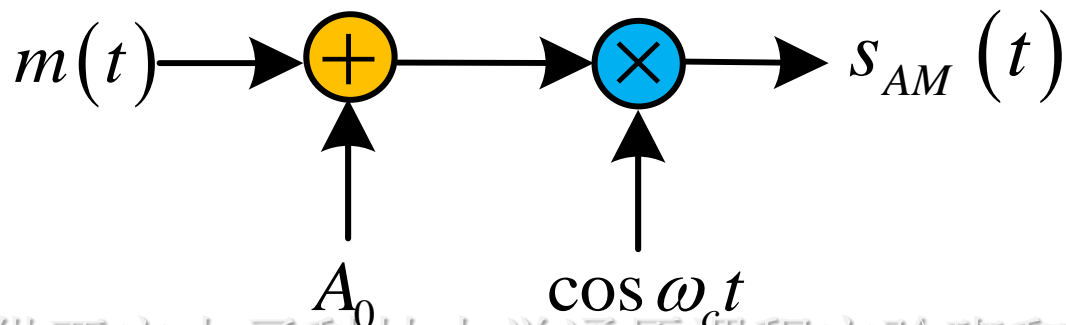


4.1 幅度调制（线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

1、调幅（AM）



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

$$= A_0 \cos \omega_c t + m(t) \cos \omega_c t$$

注：(1) $\overline{m(t)} = 0$ (2) $A_0 \geq |m(t)|_{\max}$

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

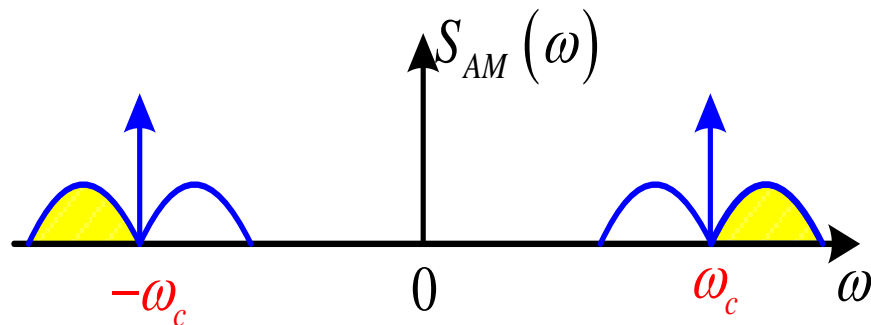
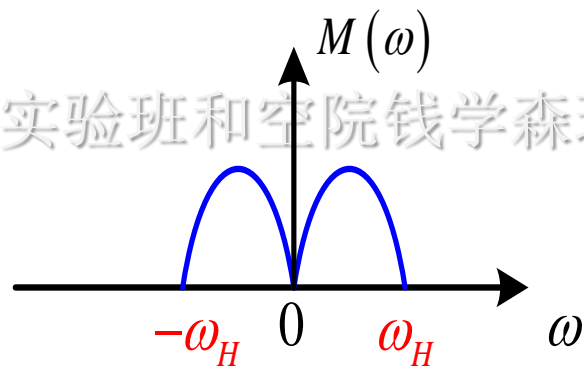
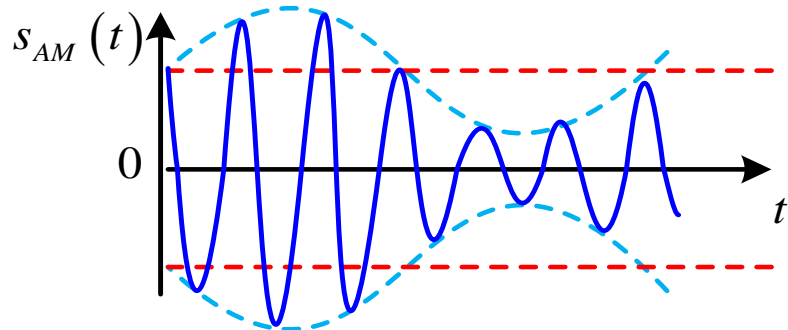
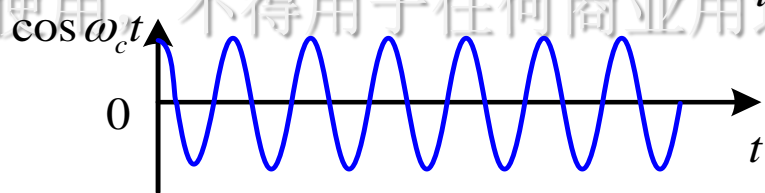
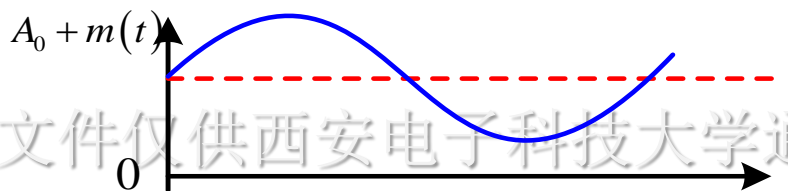
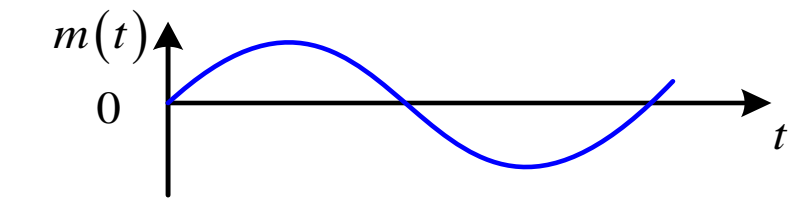


4.1 幅度调制（线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

AM信号的波形和频谱：



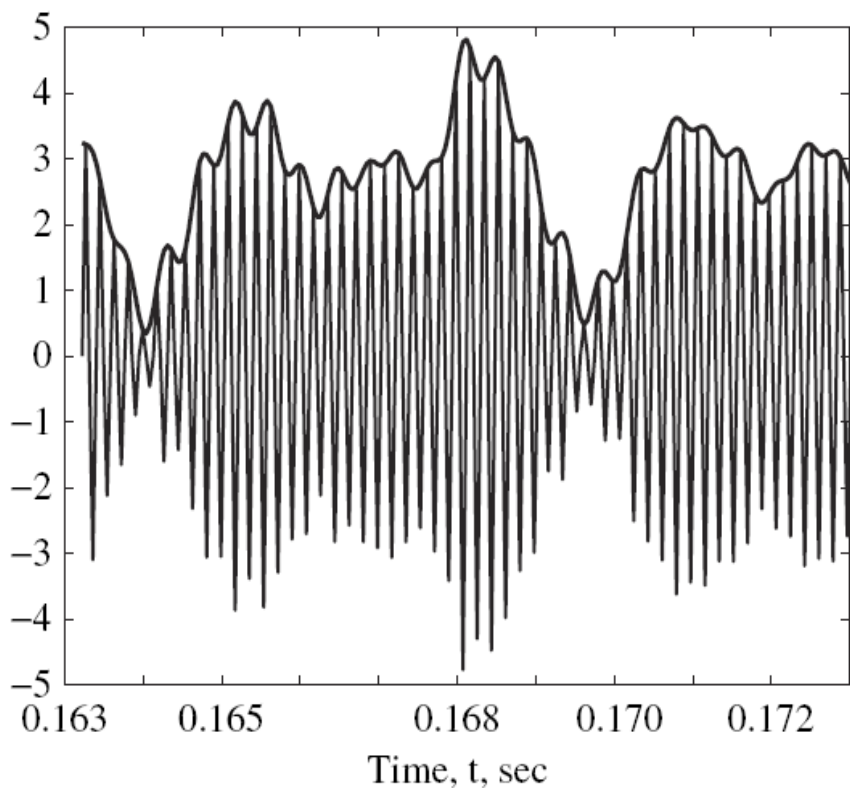


4.1 幅度调制（线性调制）的原理

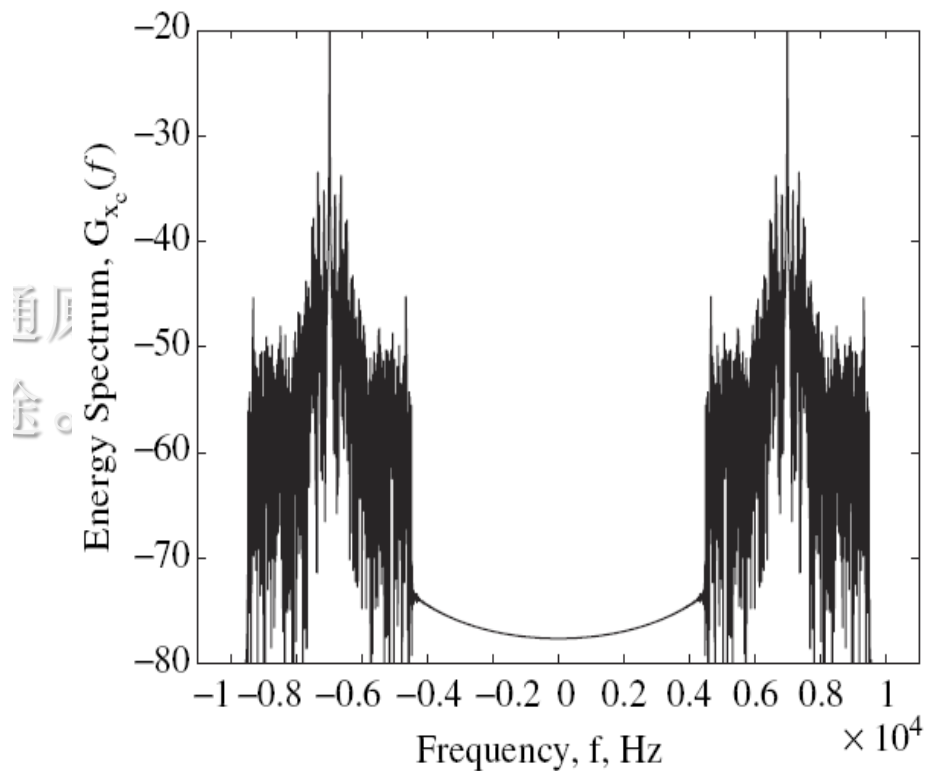
西安电子科技大学

通信工程学院

AM信号的波形和频谱：



(a) The time domain signals



(b) The bandpass energy spectrum



4.1 幅度调制（线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

AM信号的特点：

①包络与 $m(t)$ 成正比。

②已调信号带宽：

$$B_{AM} = 2f_H$$

③已调信号功率：

$$P_{AM} = \frac{A_0^2}{2} + \frac{\overline{m^2(t)}}{2} = P_C + P_S$$

④功率利用率低。

$$\text{调制效率 } \eta_{Am} = \frac{P_S}{P_{AM}} = \frac{\overline{m(t)^2}}{A_0^2 + \overline{m(t)^2}}$$



AM广播的频带分配与效率

西安电子科技大学

通信工程学院

The most common example of voice transmission in the United States is AM broadcasting. AM broadcasting in the United States usually refers to transmissions confined to a band from 535 kHz to 1,700 kHz. The channels are set up to have center frequencies spaced at 10 kHz spacings and the US Federal Communications Commission (FCC) allows each station to use about 8 kHz of bandwidth ($B_T = 8$ kHz). Since each voice band signal has a bandwidth of around $W = 4$ kHz, AM broadcast in the United States achieves a bandwidth efficiency of

$$E_B = \frac{4}{8} = 50\%$$

本文件仅供西安电子科技大学通信工程课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任

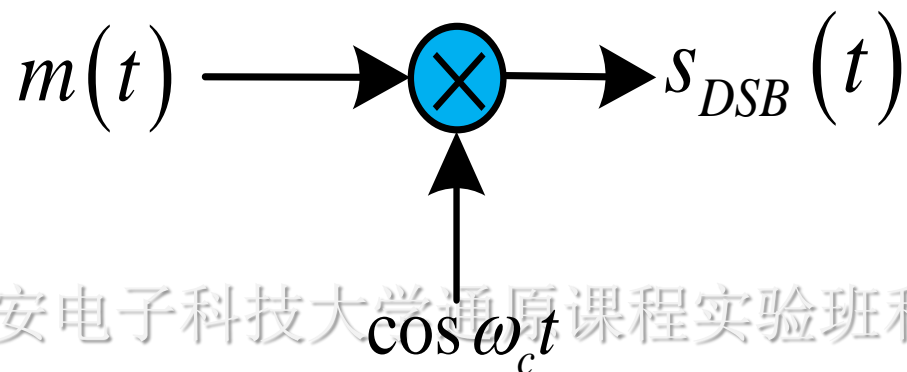


4.1 幅度调制（线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

2、抑制载波双边带调制 (DSB-SC)



本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

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

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

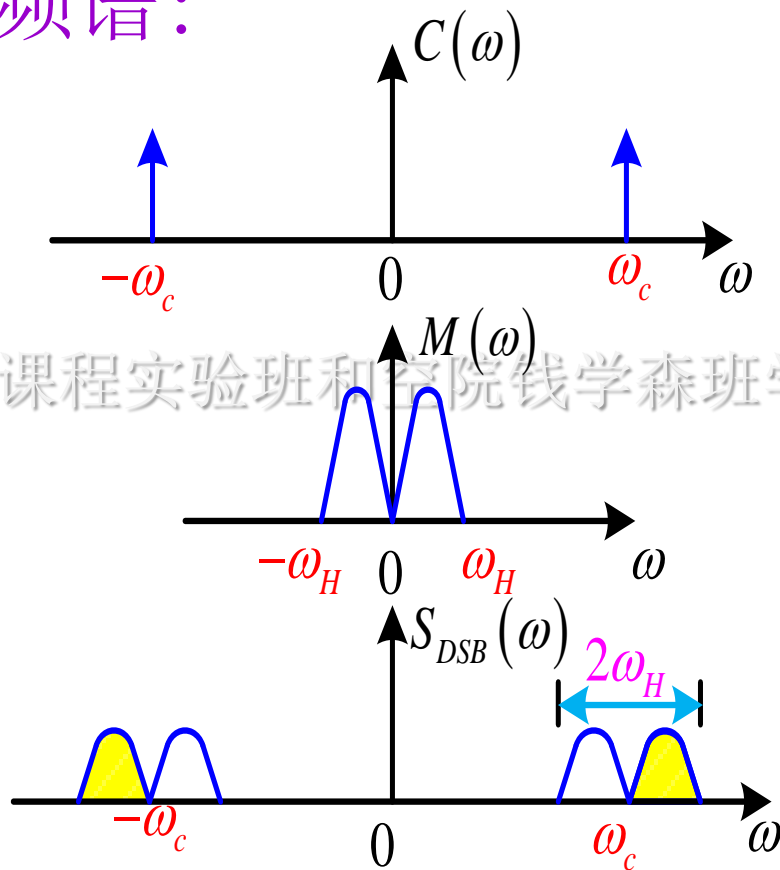
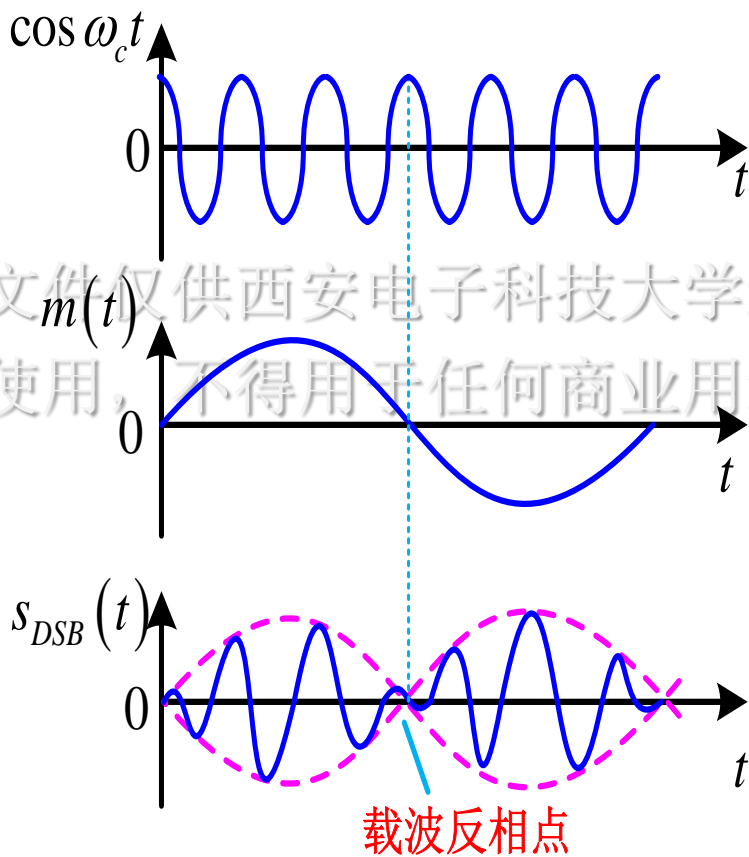


4.1 幅度调制（线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

DSB信号的波形和频谱：



本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

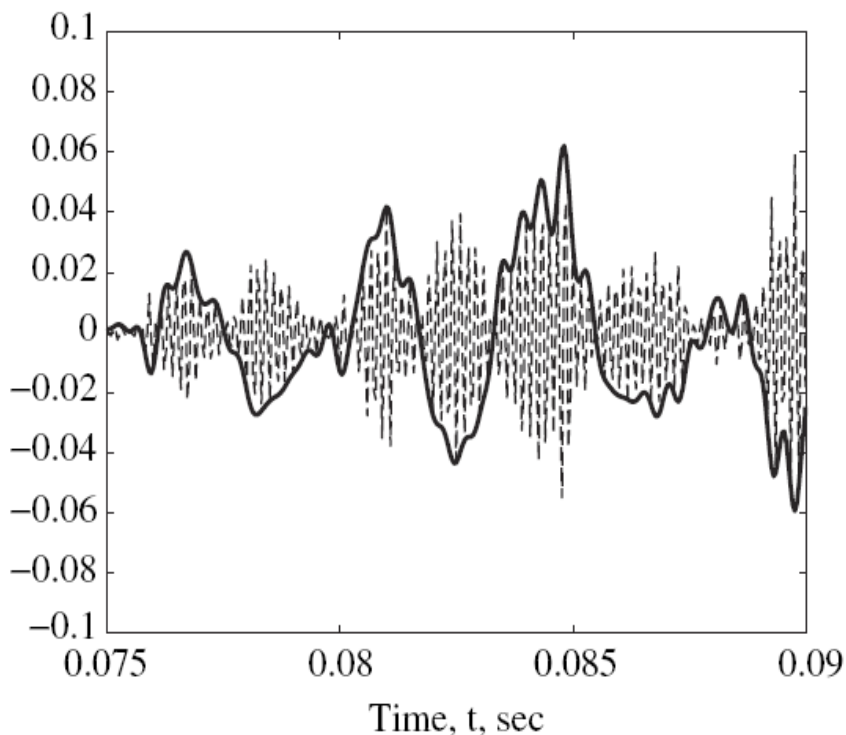


4.1 幅度调制（线性调制）的原理

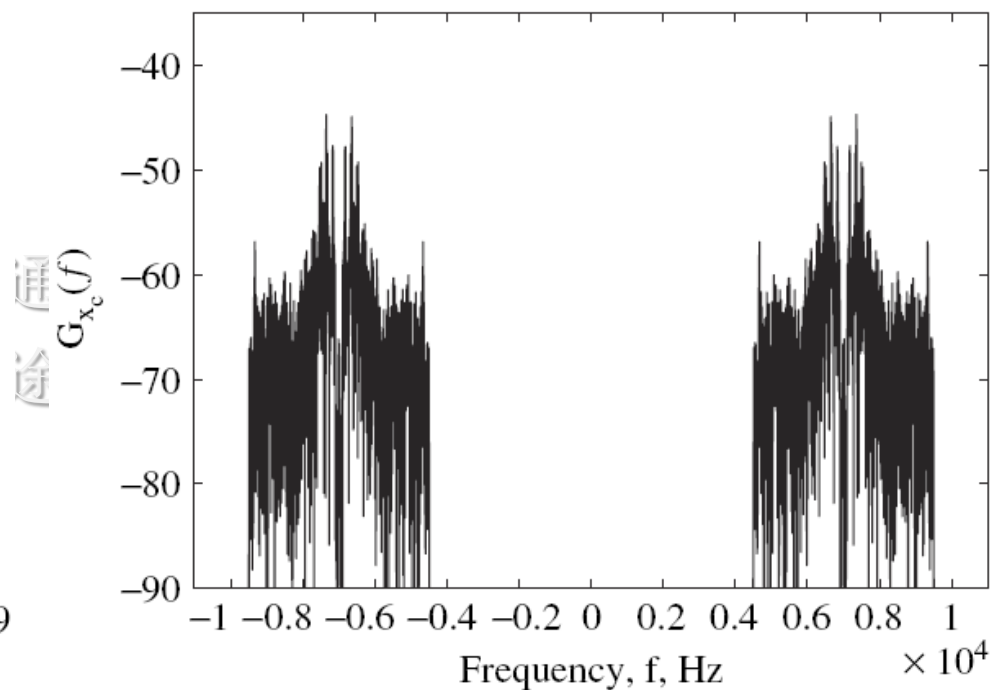
西安电子科技大学

通信工程学院

DSB信号的波形和频谱：



(a) A short time record of the message signal, $m(t)$, and the corresponding modulated signal.



(b) An energy spectrum of the DSB-AM signal.



4.1 幅度调制（线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

DSB信号的特点：

①包络与 $m(t)$ 不成正比。

② $m(t)$ 过零点处，高频载波相位有 180° 的突变。

③ 已调信号带宽： $B_{DSB} = 2f_H$

④功率利用率高。



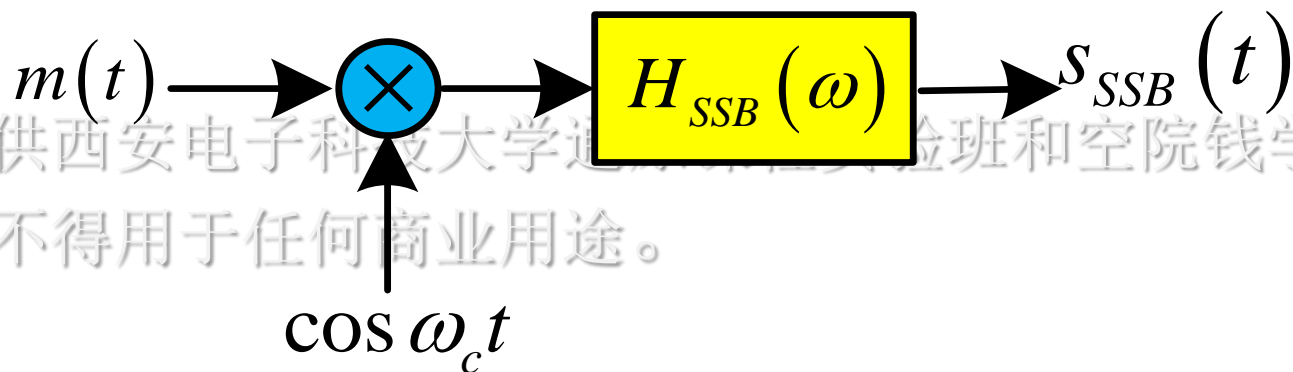
4.1 幅度调制（线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

3、单边带调制 (SSB)

(1) 滤波法



本文件仅供西安电子科技大学通信工程专业和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

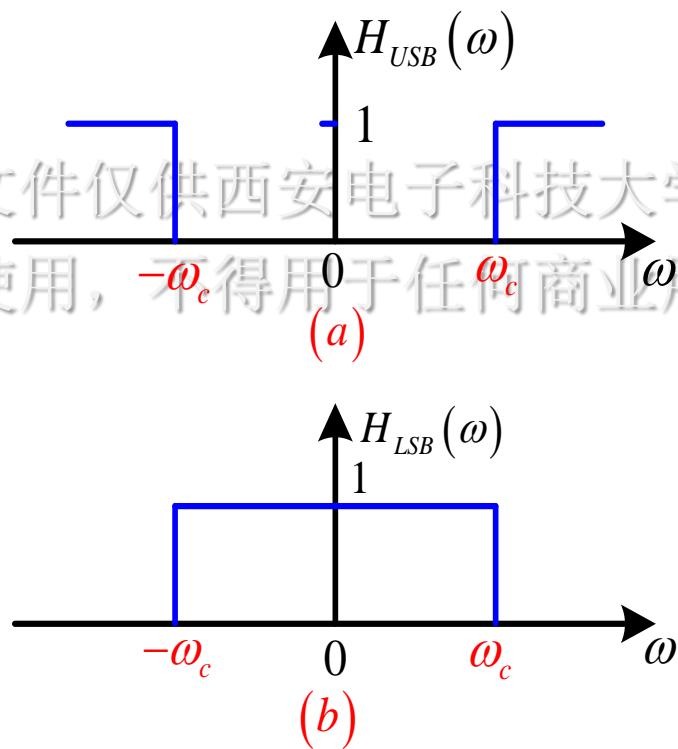


4.1 幅度调制（线性调制）的原理

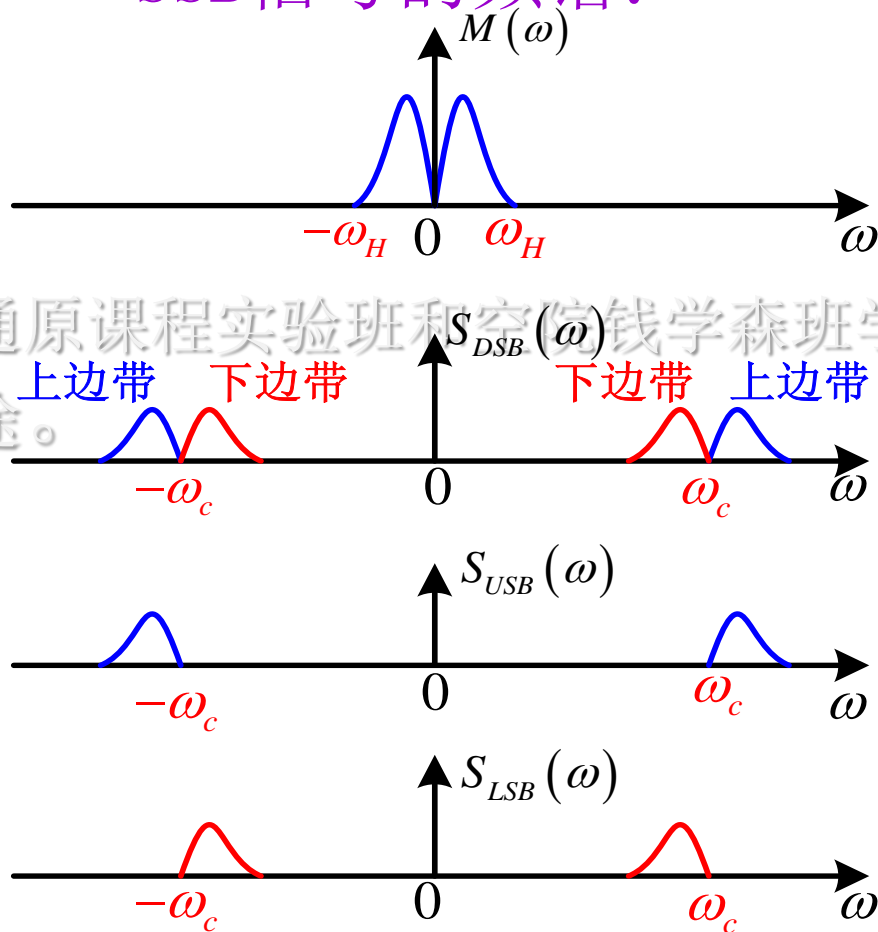
西安电子科技大学

通信工程学院

形成SSB信号的
滤波特性：



SSB信号的频谱：



本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



4.1 幅度调制（线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

(2)相移法

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

$$s_{DSB}(t) = A_m \cos \omega_m t \cdot \cos \omega_c t$$

$$= \frac{1}{2} A_m \cos(\omega_c + \omega_m)t + \frac{1}{2} A_m \cos(\omega_c - \omega_m)t$$

$$s_{USB}(t) = \frac{1}{2} A_m \cos(\omega_c + \omega_m)t$$

$$= \frac{1}{2} A_m \cos \omega_m t \cos \omega_c t - \frac{1}{2} A_m \sin \omega_m t \sin \omega_c t$$

$$= \frac{1}{2} m(t) \cos \omega_c t - \frac{1}{2} \hat{m}(t) \sin \omega_c t$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



4.1 幅度调制（线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

$$S_{SSB}(t) = \frac{1}{2}m(t)\cos\omega_c t \pm \frac{1}{2}\hat{m}(t)\sin\omega_c t$$

＋：下边带 －：上边带

若 $m(t) \Leftrightarrow M(\omega)$, $\hat{m}(t) \Leftrightarrow \hat{M}(\omega)$

则Hilbert滤波器传递函数为：

$$H_h(\omega) = \hat{M}(\omega)/M(\omega) = -j\operatorname{sgn}\omega$$

即幅度不变，所有频率分量相移 $\frac{\pi}{2}$

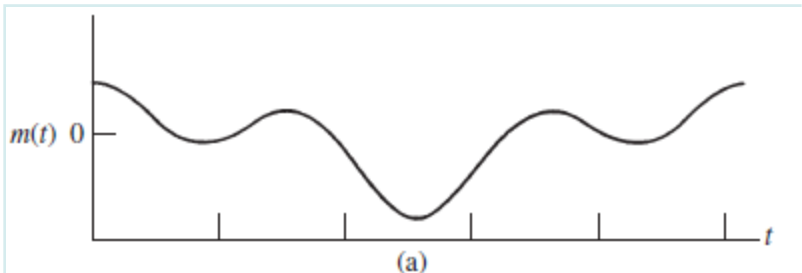


4.1 幅度调制（线性调制）的原理

西安电子科技大学

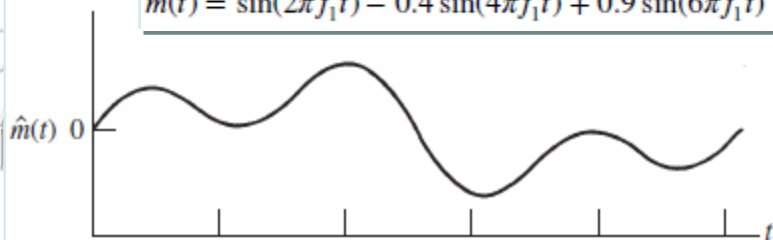
通信工程学院

$$m(t) = \cos(2\pi f_1 t) - 0.4 \cos(4\pi f_1 t) + 0.9 \cos(6\pi f_1 t)$$

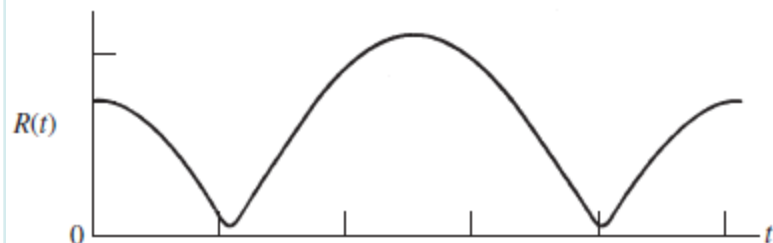


(a)

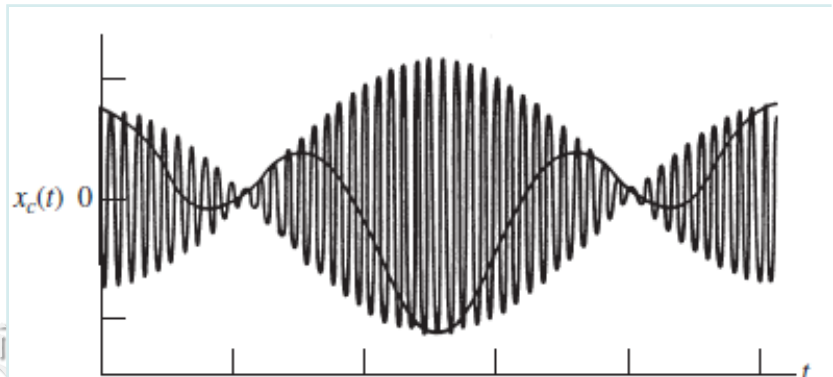
$$\hat{m}(t) = \sin(2\pi f_1 t) - 0.4 \sin(4\pi f_1 t) + 0.9 \sin(6\pi f_1 t)$$



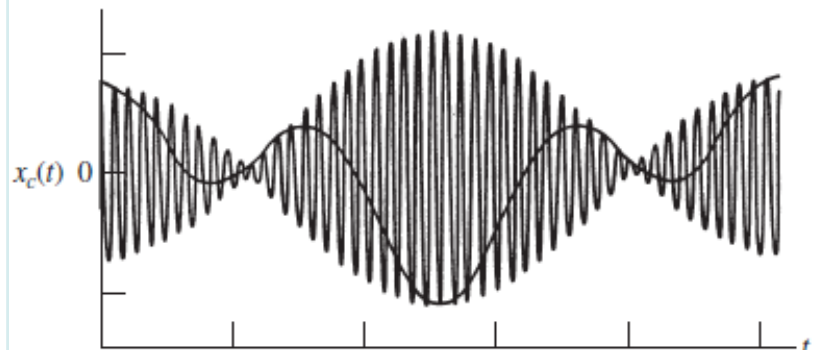
(b)



(c)



(d)



(e)

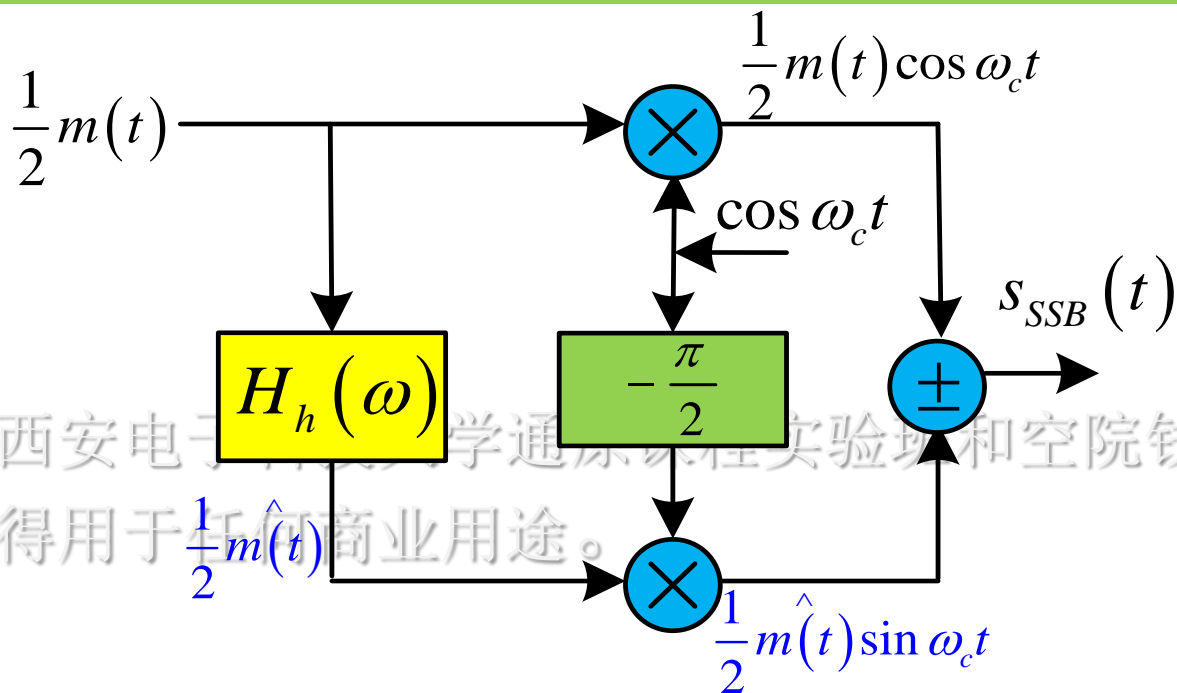
SSB信号



4.1 幅度调制（线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院



SSB信号的特点：

- ①已调信号带宽： $B_{SSB} = f_H$
- ②功率利用率高。

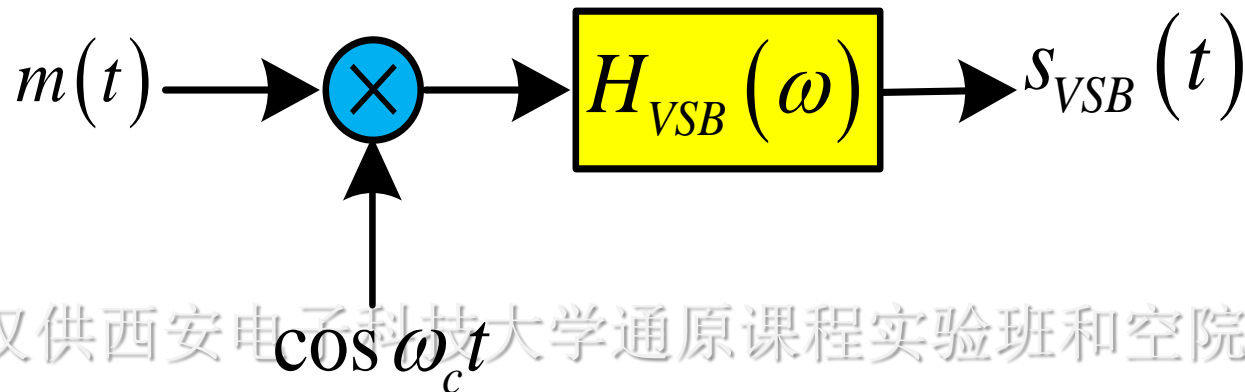


4.1 幅度调制（线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

4、残留边带调制(VSB)



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

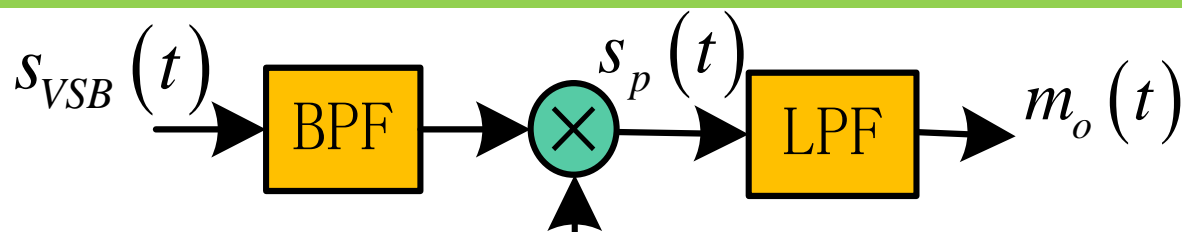
本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



4.1 幅度调制（线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院



$$\cos \omega_c t \quad S_{VSB}(\omega) = \frac{1}{2} [M(\omega + \omega_c) + M(\omega - \omega_c)] \cdot H_{VSB}(\omega)$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$\begin{aligned} S_p(\omega) &= \frac{1}{2} [S_{VSB}(\omega + \omega_c) + S_{VSB}(\omega - \omega_c)] \\ &= \frac{1}{4} [M(\omega + 2\omega_c) + M(\omega)] H_{VSB}(\omega + \omega_c) \\ &\quad + \frac{1}{4} [M(\omega) + M(\omega - 2\omega_c)] H_{VSB}(\omega - \omega_c) \end{aligned}$$



4.1 幅度调制（线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

$$M_o(\omega) = \frac{1}{4} M(\omega) [H_{VSB}(\omega + \omega_c) + H_{VSB}(\omega - \omega_c)]$$

残留边带滤波器的传输函数必须满足

$$H_{VSB}(\omega + \omega_c) + H_{VSB}(\omega - \omega_c) = \text{const}, |\omega| \leq \omega_H$$

即在 ω_c 处具有互补对称特性。

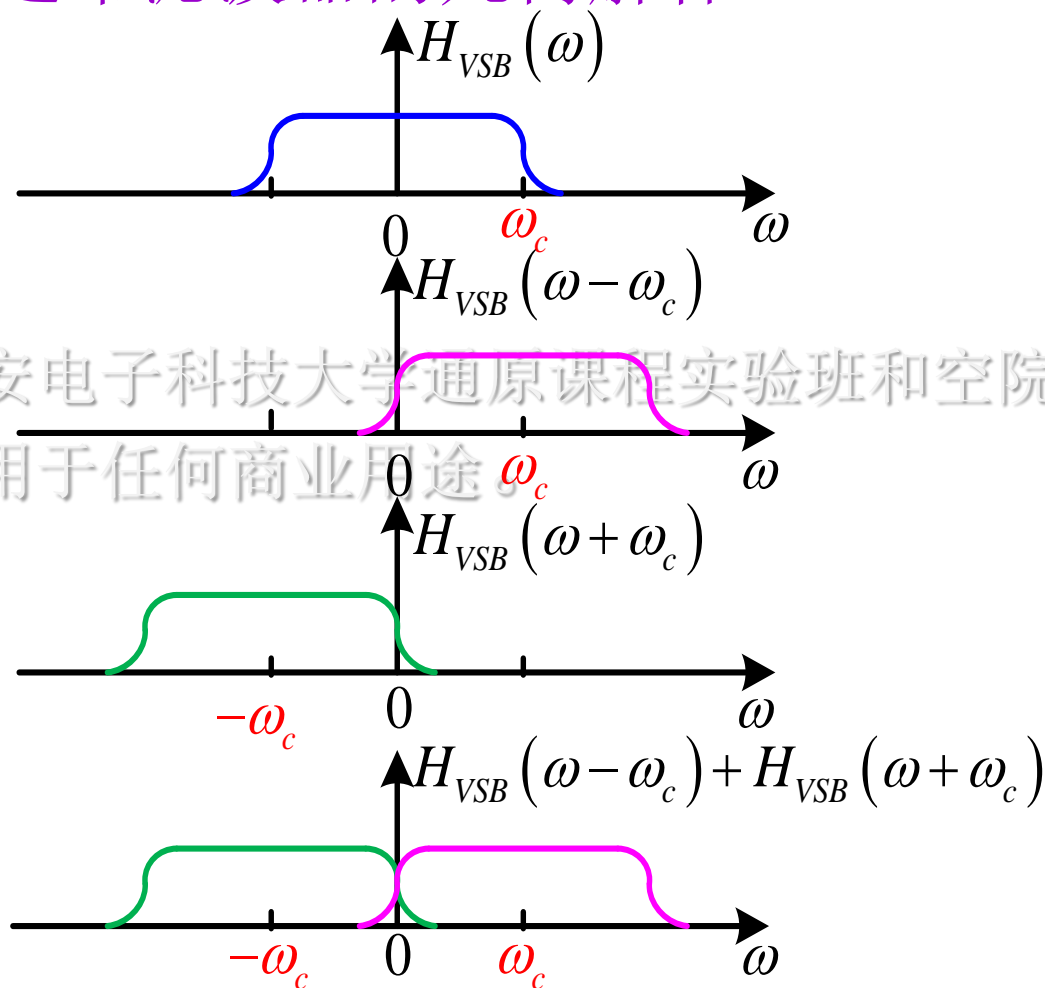


4.1 幅度调制（线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

残留边带滤波器的几何解释：



本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途



通信工程学院

The graph shows the magnitude response $H_{VSB}(\omega)$ as a function of angular frequency ω . The response is a raised cosine function centered at $\omega = 0$, with a maximum value of 1. The bandwidth is defined by the cutoff frequencies $-\omega_c$ and ω_c , indicated by dashed vertical lines. A dashed horizontal line is drawn at $H_{VSB}(\omega) = 0.5$.

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

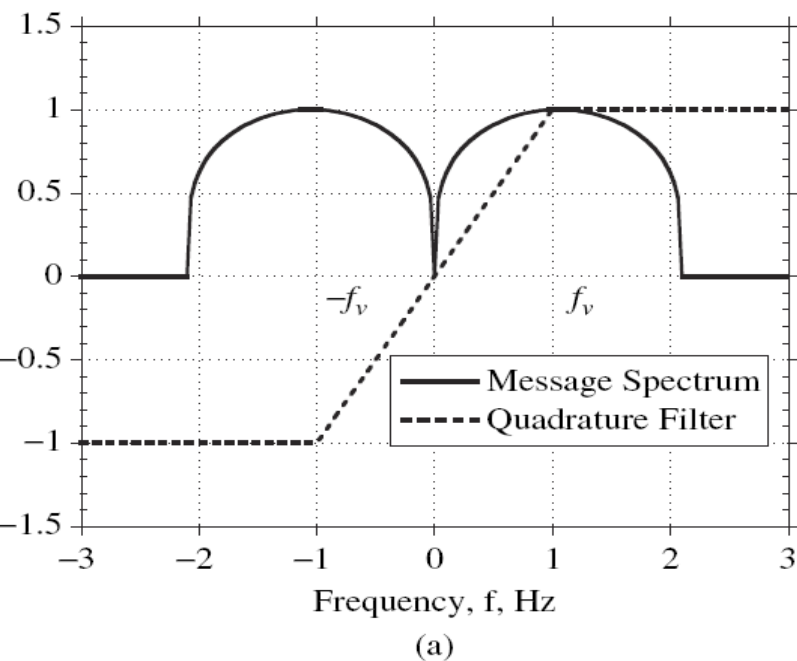


4.1 幅度调制（线性调制）的原理

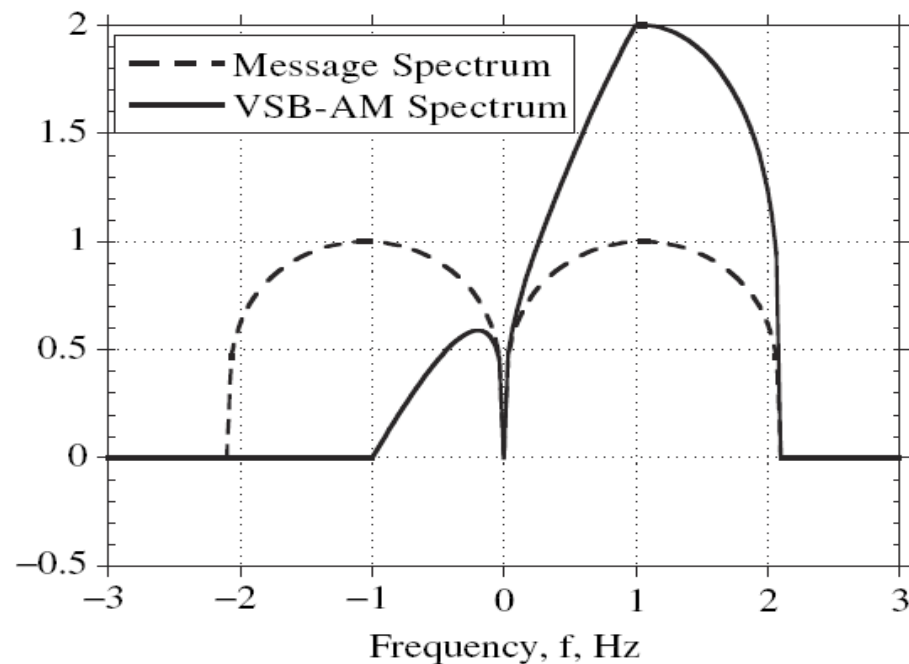
西安电子科技大学

通信工程学院

残留边带信号的频谱形状



通信
用途





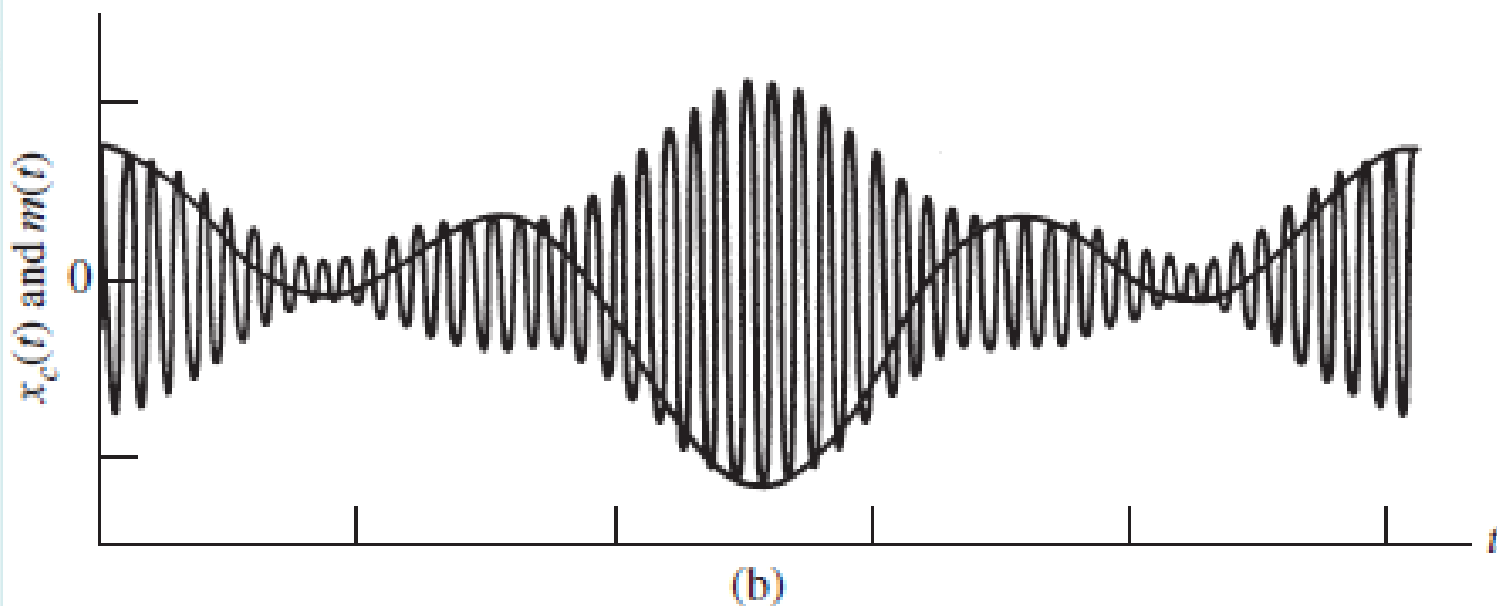
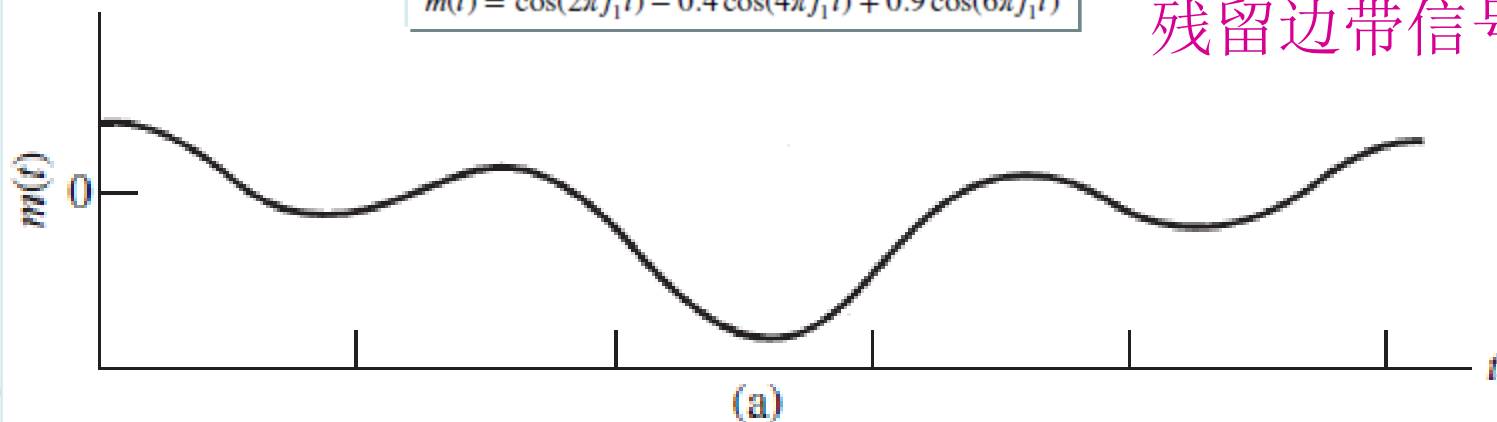
4.1 幅度调制（线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

$$m(t) = \cos(2\pi f_1 t) - 0.4 \cos(4\pi f_1 t) + 0.9 \cos(6\pi f_1 t)$$

残留边带信号



本文件
习使用



4.1 幅度调制（线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

VSB信号的特点：

①既克服了DSB信号占用频带宽的缺点，又克服

了SSB滤波器不易实现的困难。

②带宽与滤波器实现难易程度之间存在矛盾。

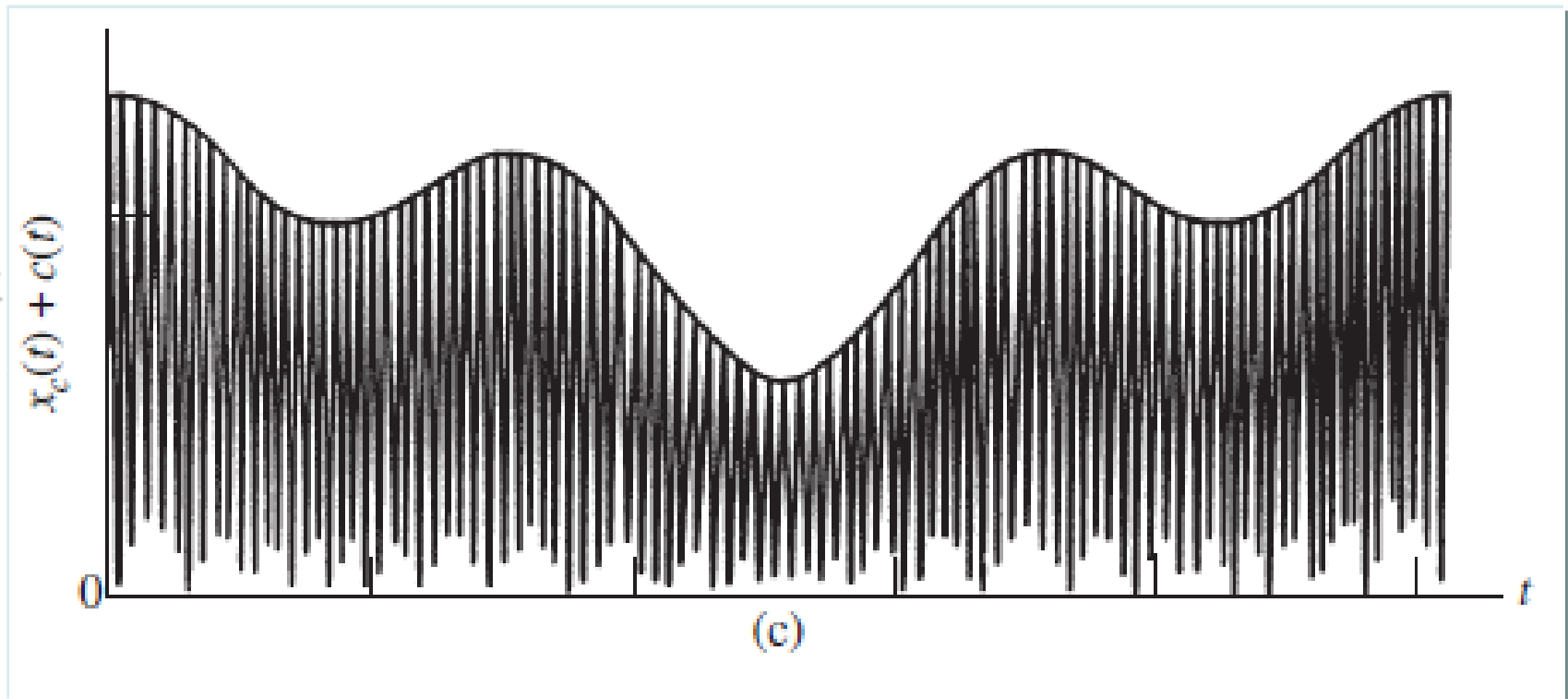


4.1 幅度调制（线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

残留边带信号+载波





4.1 幅度调制（线性调制）的原理

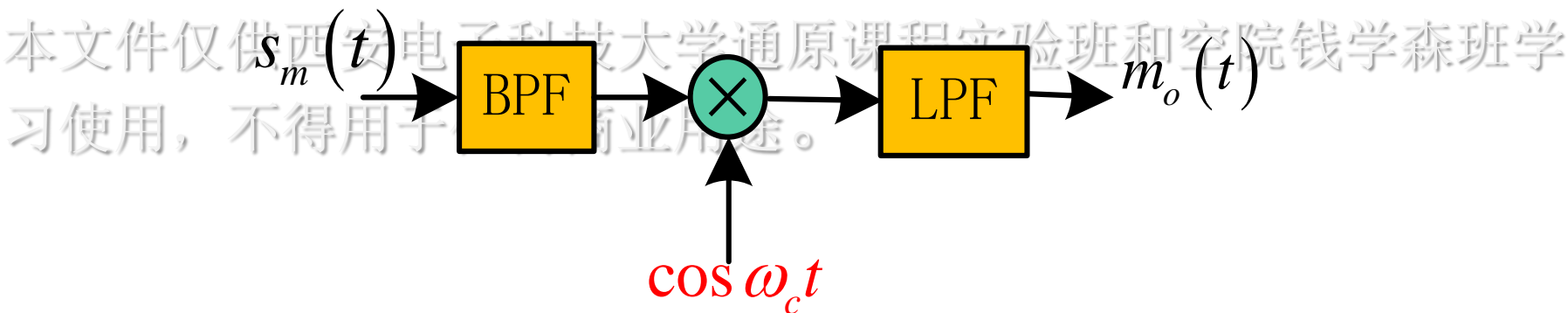
西安电子科技大学

通信工程学院

二、线性调制信号的解调

1、相干解调法

适用：AM、DSB、SSB、VSB



关键：收端产生与信号载波同频同相的相干载波。



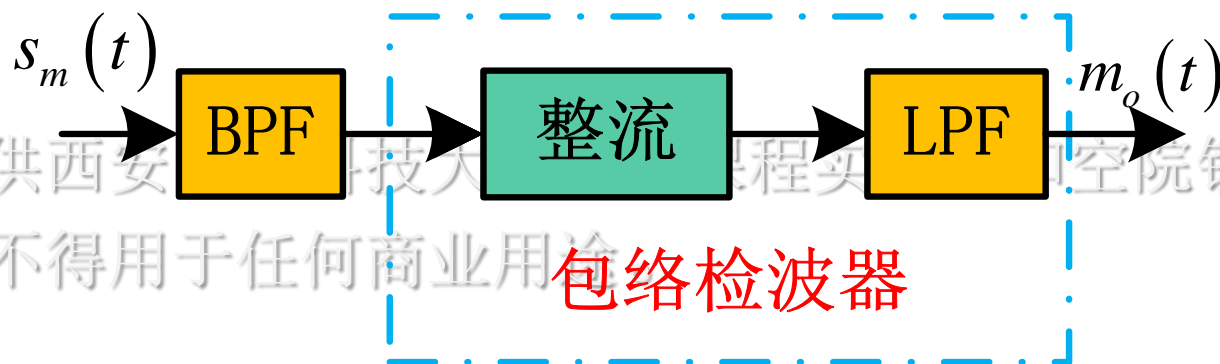
4.1 幅度调制（线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

2、包络检波法

适用：AM



3、插入载波包络检波法

适用：DSB、SSB、VSB

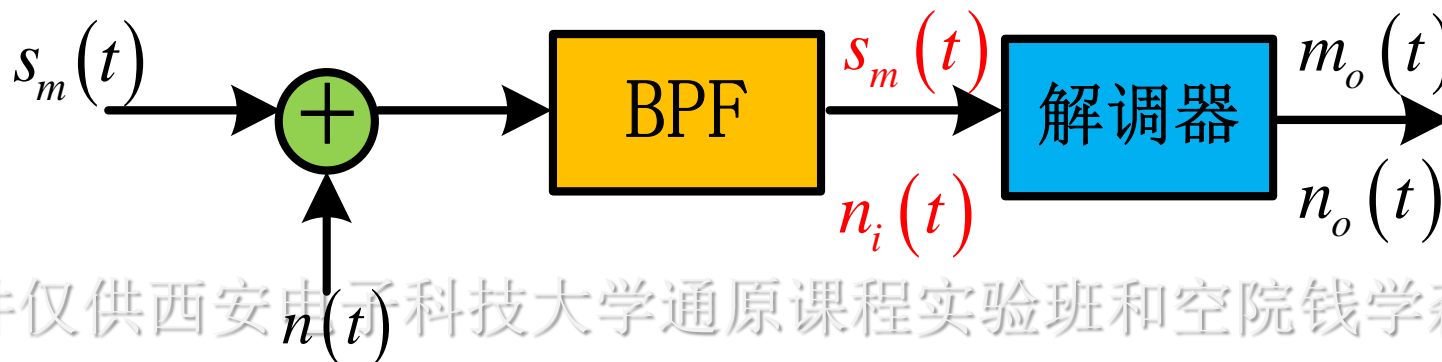


4.2 线性调制系统的抗噪声性能

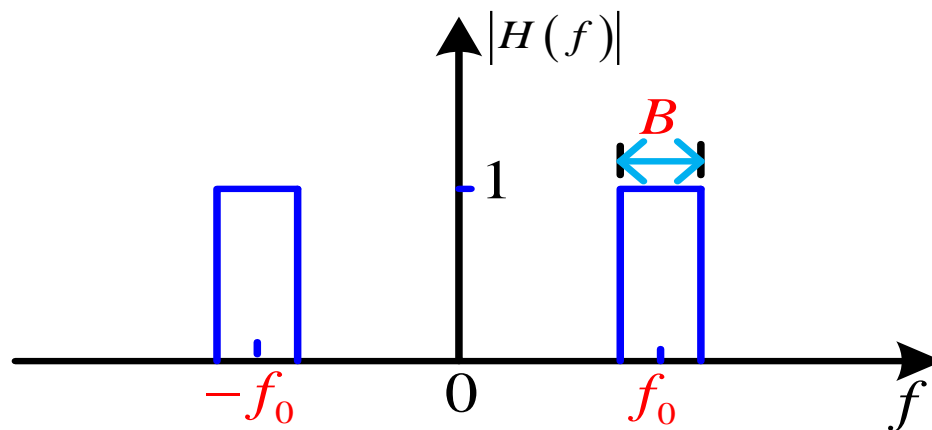
西安电子科技大学

通信工程学院

一、分析模型



带通滤波器的传输特性：





4.2 线性调制系统的抗噪声性能

西安电子科技大学

通信工程学院

$$n_i(t) = n_c(t) \cos \omega_0 t - n_s(t) \sin \omega_0 t$$

$$\overline{n_c(t)} = \overline{n_s(t)} = \overline{n_i(t)} = 0$$

$$\overline{n_c^2(t)} = \overline{n_s^2(t)} = \overline{n_i^2(t)} = N_i = n_0 B$$

衡量模拟通信系统质量的性能指标:

① 输出信噪比

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{\overline{m_o^2(t)}}{\overline{n_o^2(t)}}$$

S_i, n_0, f_H 相同: $\frac{S_o}{N_o} \uparrow \Rightarrow$ 抗噪声性能 \uparrow

② 调制制度增益

$$G = \frac{S_o / N_o}{S_i / N_i}$$

其中

$$\frac{S_i}{N_i} = \frac{\overline{s_m^2(t)}}{\overline{n_i^2(t)}}$$



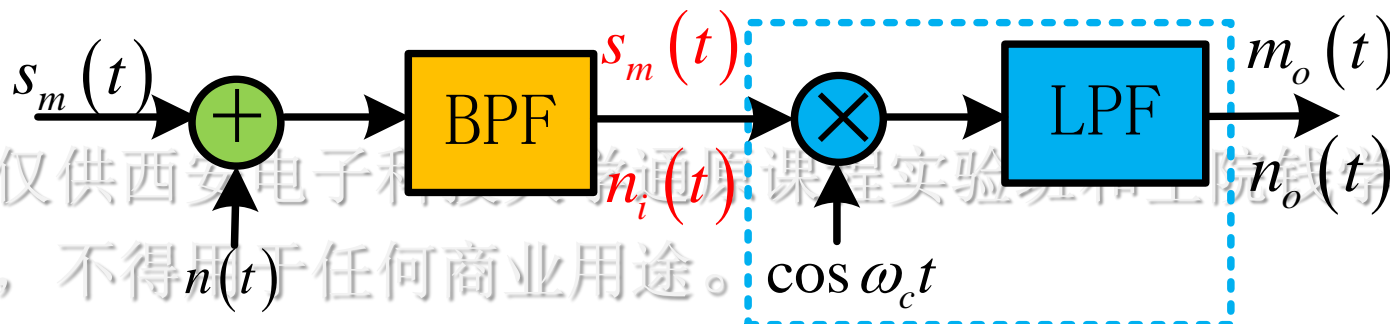
4.2 线性调制系统的抗噪声性能

西安电子科技大学

通信工程学院

二、性能分析

1、DSB系统



$$BPF: f_0 = f_c, \quad B = 2f_H$$





4.2 线性调制系统的抗噪声性能

西安电子科技大学

通信工程学院

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

$$\therefore S_i = \overline{s_m^2(t)} = \overline{[m(t) \cos \omega_c t]^2} = \frac{1}{2} \overline{m^2(t)}$$

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

$$\therefore S_o = \overline{m_o^2(t)} = \frac{1}{4} \overline{m^2(t)}$$

$$n_i(t) = n_c(t) \cos \omega_c t - n_s(t) \sin \omega_c t$$

$$N_i = n_0 B \quad B = 2f_H$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



4.2 线性调制系统的抗噪声性能

西安电子科技大学

通信工程学院

$$n_o(t) = \frac{1}{2} n_c(t)$$

$$\therefore N_o = \overline{n_o^2(t)} = \frac{1}{4} \overline{n_c^2(t)} = \frac{1}{4} N_i$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用， $G_{DSB} = 2$ 不得用于任何商业用途。

分析：相干解调将噪声中的正交分量抑制掉，所以使信噪比改善一倍。



4.2 线性调制系统的抗噪声性能

西安电子科技大学

通信工程学院

2、SSB系统

$$BPF: f_0 = f_c \pm \frac{1}{2} f_H, \quad B = f_H$$

$$S_m(t) = \frac{1}{2} m(t) \cos \omega_c t \pm \frac{1}{2} \hat{m}(t) \sin \omega_c t$$

$$\therefore S_i = \frac{1}{4} \left[m(t) \cos \omega_c t \pm \hat{m}(t) \sin \omega_c t \right]^2 = \frac{1}{4} \overline{m^2(t)}$$

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

$$\therefore S_o = \overline{m_o^2(t)} = \frac{1}{16} \overline{m^2(t)}$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



4.2 线性调制系统的抗噪声性能

西安电子科技大学

通信工程学院

$$N_i = n_0 B \quad B = f_H \quad N_o = \frac{1}{4} N_i$$

$$G_{SSB} = 1$$

分析：信号与噪声表示形式相同，在相干解调中正交分量均被抑制掉。

$$\because S_i, n_0, f_H \text{ 相同: } \left(\frac{S_o}{N_o} \right)_{DSB} = \left(\frac{S_o}{N_o} \right)_{SSB}$$

\therefore *DSB*和*SSB*抗噪性能相同

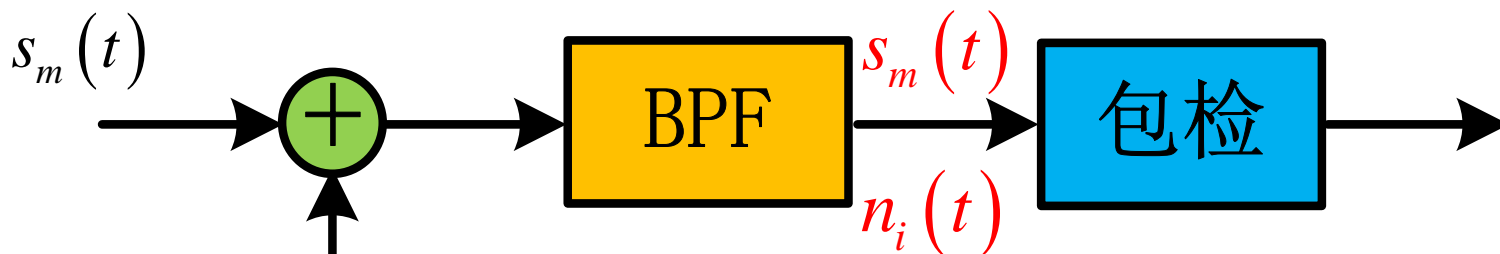


4.2 线性调制系统的抗噪声性能

西安电子科技大学

通信工程学院

3、AM系统



本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$BPF: f_0 = f_c, \quad B = 2f_H$$



4.2 线性调制系统的抗噪声性能

西安电子科技大学

通信工程学院

$$s_m(t) = [A_0 + m(t)] \cos \omega_c t$$

$$\therefore S_i = \frac{A_0^2}{2} + \frac{\overline{m^2(t)}}{2}$$

$$n_i(t) = n_c(t) \cos \omega_c t - n_s(t) \sin \omega_c t$$

$$N_i = n_0 B \quad B = 2f_H$$

$$\begin{aligned} s_m(t) + n_i(t) &= [A_0 + m(t) + n_c(t)] \cos \omega_c t - n_s(t) \sin \omega_c t \\ &= E(t) \cos [\omega_c t + \varphi(t)] \end{aligned}$$

$$E(t) = \sqrt{[A_0 + m(t) + n_c(t)]^2 + n_s^2(t)}$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



4.2 线性调制系统的抗噪声性能

西安电子科技大学

通信工程学院

(1) 大信噪比 $A_0 + m(t) \gg \sqrt{n_c^2(t) + n_s^2(t)}$

$$E(t) = \sqrt{[A_0 + m(t)]^2 + 2[A_0 + m(t)]n_c(t) + n_c^2(t) + n_s^2(t)}$$

$$\approx \sqrt{[A_0 + m(t)]^2 + 2[A_0 + m(t)]n_c(t)}$$

$$= [A_0 + m(t)] \left[1 + \frac{2n_c(t)}{A_0 + m(t)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\approx [A_0 + m(t)] \left[1 + \frac{n_c(t)}{A_0 + m(t)} \right]$$

$$= A_0 + m(t) + n_c(t)$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



4.2 线性调制系统的抗噪声性能

西安电子科技大学

通信工程学院

$$m_o(t) = m(t) \quad \therefore S_o = \overline{m_o^2(t)} = \overline{m^2(t)}$$

$$n_o(t) = n_c(t) \quad \therefore N_o = \overline{n_c^2(t)} = N_i$$

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

分析：①解调器使信噪比恶化。

②100%调制，且 $m(t)$ 为单频正弦波， $G_{AM} = \frac{2}{3}$ 。

③相干解调时的 G_{AM} 与上式相同，但不受信噪比的限制。



4.2 线性调制系统的抗噪声性能

西安电子科技大学

通信工程学院

(2) 小信噪比 $A_0 + m(t) \ll \sqrt{n_c^2(t) + n_s^2(t)}$

$$E(t) = \sqrt{[A_0 + m(t)]^2 + 2n_c(t)[A_0 + m(t)] + n_c^2(t) + n_s^2(t)}$$

$$\approx \sqrt{n_c^2(t) + n_s^2(t) + 2n_c(t)[A_0 + m(t)]}$$

$$= \sqrt{[n_c^2(t) + n_s^2(t)]} \left\{ 1 + \frac{2n_c(t)[A_0 + m(t)]}{n_c^2(t) + n_s^2(t)} \right\}$$

$$\text{令 } R(t) = \sqrt{n_c^2(t) + n_s^2(t)} \quad \cos \theta(t) = \frac{n_c(t)}{R(t)}$$



4.2 线性调制系统的抗噪声性能

西安电子科技大学

通信工程学院

$$E(t) = R(t) \left\{ 1 + \frac{2[A_0 + m(t)]}{R(t)} \cos \theta(t) \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\approx R(t) \left[1 + \frac{A_0 + m(t)}{R(t)} \cos \theta(t) \right]$$

$$= R(t) + [A_0 + m(t)] \cos \theta(t)$$

门限效应：小信噪比时，信号被检波器扰乱成噪声，导致输出信噪比急剧恶化。

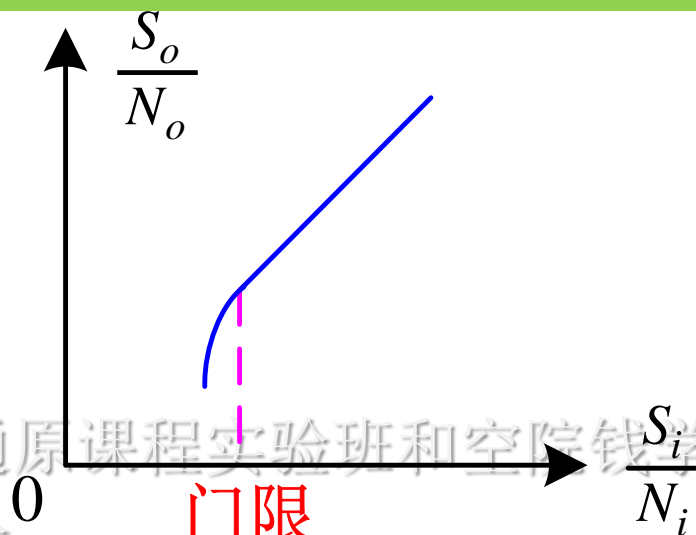


4.2 线性调制系统的抗噪声性能

西安电子科技大学

通信工程学院

门限效应示意图：



原因： 包络检波器的非线性解调作用。

结论： 包检法在大信噪比时的抗噪性能与相干解调在任意信噪比时几乎相同；小信噪比时会出现门限效应。



4.2 线性调制系统的抗噪声性能

西安电子科技大学

通信工程学院

【例】DSB系统中，调制信号 $m(t)$ 的功率谱密度为

$$P_m(f) = \begin{cases} \frac{n_m}{2} \cdot \frac{|f|}{f_m}, & |f| \leq f_m \\ 0, & |f| > f_m \end{cases}$$

- 本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途
- (1) 求接收机的输入信号功率；
 - (2) 求接收机的输出信号功率；
 - (3) 若噪声的双边功率谱密度为 $n_0/2$ ，LPF 的截止频率为 f_m ，则输出信噪比是多少？



4.2 线性调制系统的抗噪声性能

西安电子科技大学

通信工程学院

解: (1) $s_m(t) = m(t) \cos \omega_c t$

$$S_i = \frac{1}{2} \overline{m^2(t)} = \frac{1}{2} \int_{-f_m}^{f_m} P_m(f) df = \frac{1}{4} f_m n_m$$

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

$$S_o = \frac{1}{4} \overline{m^2(t)} = \frac{1}{8} f_m n_m$$

(3) $N_i = n_0 B = 2n_0 f_m$

$$\frac{S_o}{N_o} = 2 \frac{S_i}{N_i} = \frac{1}{4} \frac{n_m}{n_0}$$





4.2 线性调制系统的抗噪声性能

西安电子科技大学

通信工程学院

【例】 某线性调制系统的输出信噪比为20dB，输

出噪声功率为 $10^{-9}W$ ，由发射机输出端到解调器

输入端之间总的传输损耗为100dB ，试求：

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学

习使用，不得用于任何商业用途。
(1) DSB/SC时的发射机输出功率；

(2) SSB/SC时的发射机输出功率。



4.2 线性调制系统的抗噪声性能

西安电子科技大学

通信工程学院

解: $L = \frac{S_T}{S_i} = 10^{10} \quad (100dB), \quad \frac{S_o}{N_o} = 100 \quad (20dB), \quad N_o = 10^{-9} W$

(1) DSB $S_o = N_o \cdot \frac{S_o}{N_o} = 10^{-7} W$

$\therefore S_o = \frac{1}{2} S_i \quad \therefore S_i = 2S_o = 2 \times 10^{-7} W$

$S_T = L \cdot S_i = 2 \times 10^3 W$

(2) SSB $S_o = 10^{-7} W$

$\therefore S_o = \frac{1}{4} S_i \quad \therefore S_i = 4S_o = 4 \times 10^{-7} W$

$S_T = L \cdot S_i = 4 \times 10^3 W$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用, 不得用于任何商业用途。



4.3 角调制（非线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

一、角调制的基本概念

$$s_m(t) = A \cos[\omega_c t + \varphi(t)]$$

$\omega_c t + \varphi(t)$: 瞬时相位

$\varphi(t)$: 相对于 $\omega_c t$ 的瞬时相位偏移

$\frac{d[\omega_c t + \varphi(t)]}{dt}$: 瞬时角频率

$\frac{d\varphi(t)}{dt}$: 相对于 ω_c 的瞬时角频偏

本文件仅供西安电子科技大学通信工程专业钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



4.3 角调制（非线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

一、角调制的基本概念

PM: $\varphi(t) = K_p m(t)$ K_p : 比例常数

$$s_{PM}(t) = A \cos[\omega_c t + K_p m(t)]$$

FM: $\frac{d\varphi(t)}{dt} = K_f m(t)$ K_f : 比例常数 $\text{rad}/(\text{s} \cdot \text{V})$

$$\varphi(t) = K_f \int m(t) dt$$

$$s_{FM}(t) = A \cos\left[\omega_c t + K_f \int m(t) dt\right]$$

两者关系:

$$m(t) \rightarrow \int \rightarrow PM \Leftrightarrow FM \quad \text{间接FM}$$

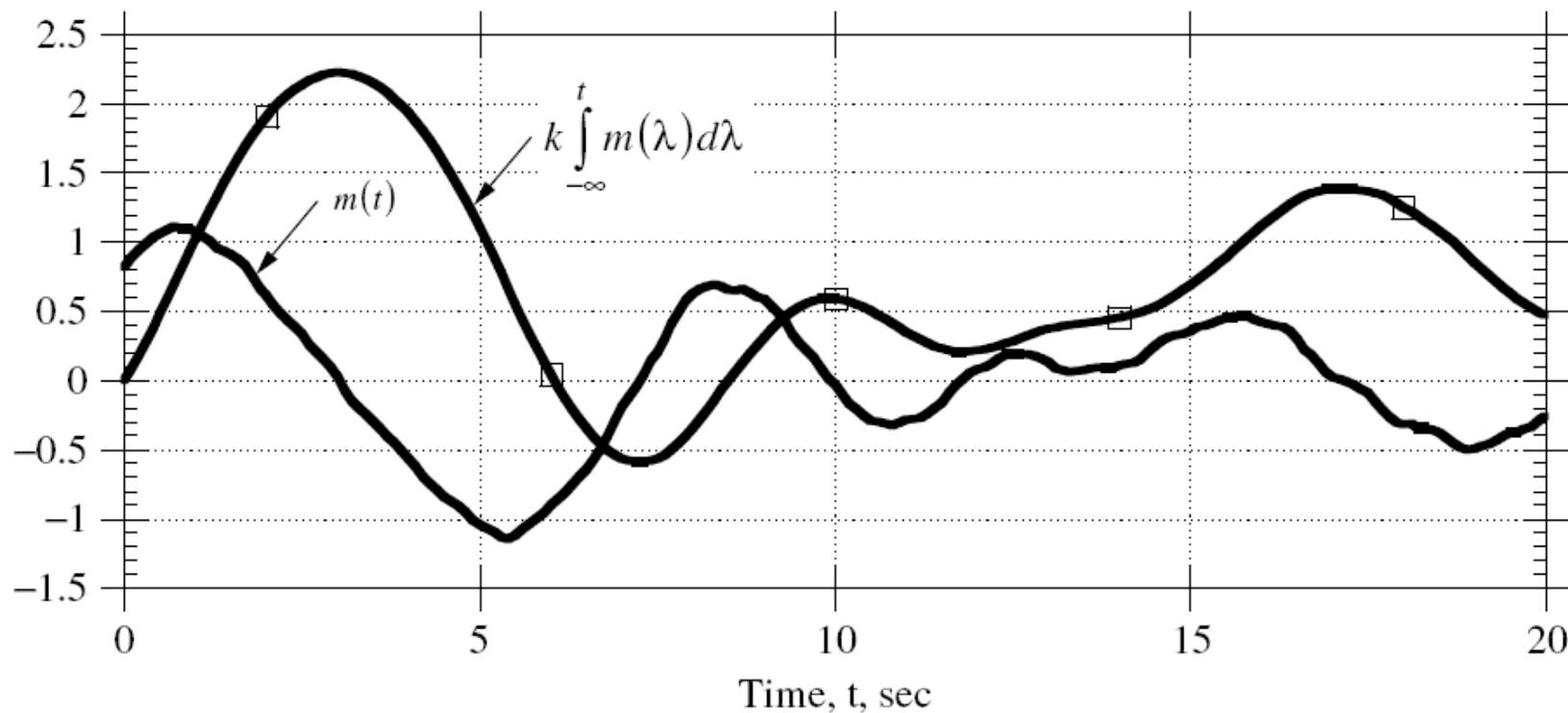
$$m(t) \rightarrow \frac{d}{dt} \rightarrow FM \Leftrightarrow PM \quad \text{间接PM}$$



4.3 角调制（非线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院



$m(t)$ 和 $m(t)$ 的积分波形

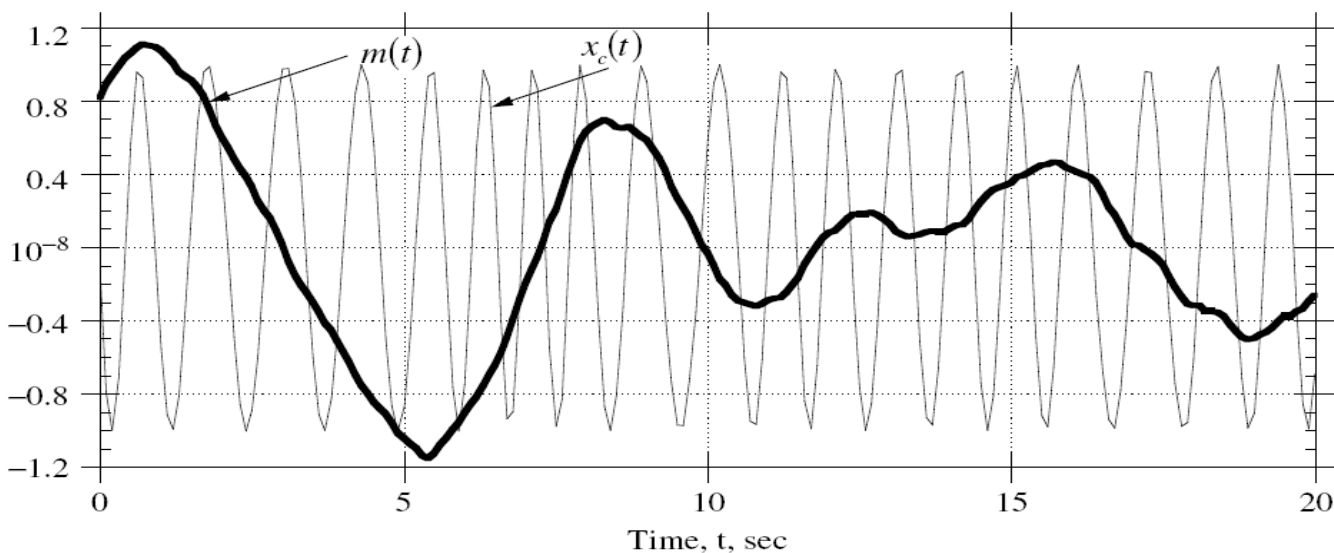


4.3 角调制（非线性调制）的原理

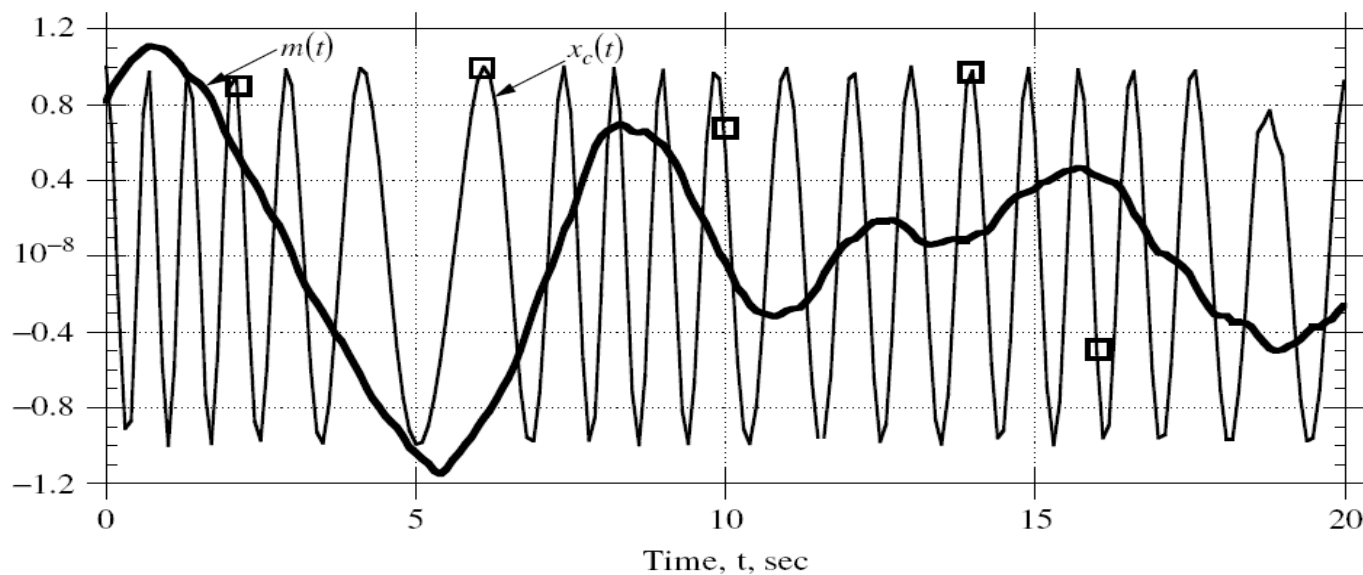
西安电子科技大学

通信工程学院

PM
信号
波形



FM
信号
波形



森班学



4.3 角调制（非线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

二、窄带调频与宽带调频

$$\left| K_f \int m(t) dt \right|_{\max} \ll \frac{\pi}{6}$$

窄带调频

反之宽带调频

$$m(t) = A_m \cos \omega_m t \quad \frac{d\varphi(t)}{dt} = K_f \cdot A_m \cos \omega_m t$$

$$\varphi(t) = A_m K_f \int \cos \omega_m t dt = \frac{A_m K_f}{\omega_m} \sin \omega_m t = m_f \sin \omega_m t$$

$$\Delta\omega = A_m K_f$$

最大角频偏

$$m_f = \frac{\Delta\omega}{\omega_m} = \frac{\Delta f}{f_m}$$

调频指数

本文件仅供西安电子科技大学通信工程实验班和全院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



4.3 角调制（非线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

三、调频信号的带宽

$$s_{FM}(t) = A \cos(\omega_c t + m_f \sin \omega_m t) = A \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m_f) \cos(\omega_c + n\omega_m)t$$

$J_n(m_f)$: 第一类n阶贝塞尔函数

$$J_n(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp[-j(n\theta - x \sin \theta)] d\theta$$

1. $J_n(x)$ is real valued
2. $J_n(x) = J_{-n}(x)$ n even
3. $J_n(x) = -J_{-n}(x)$ n odd
4. $\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(x) = 1$

5. $\lim_{n \rightarrow \infty} |J_n(x)| = 0$
6. When $\beta \ll 1$
 - (a) $J_0(\beta) \approx 1$
 - (b) $J_1(\beta) \approx \frac{\beta}{2}$
 - (c) $J_n(\beta) \approx 0 \quad \forall \quad |n| > 1$



4.3 角调制（非线性调制）的原理

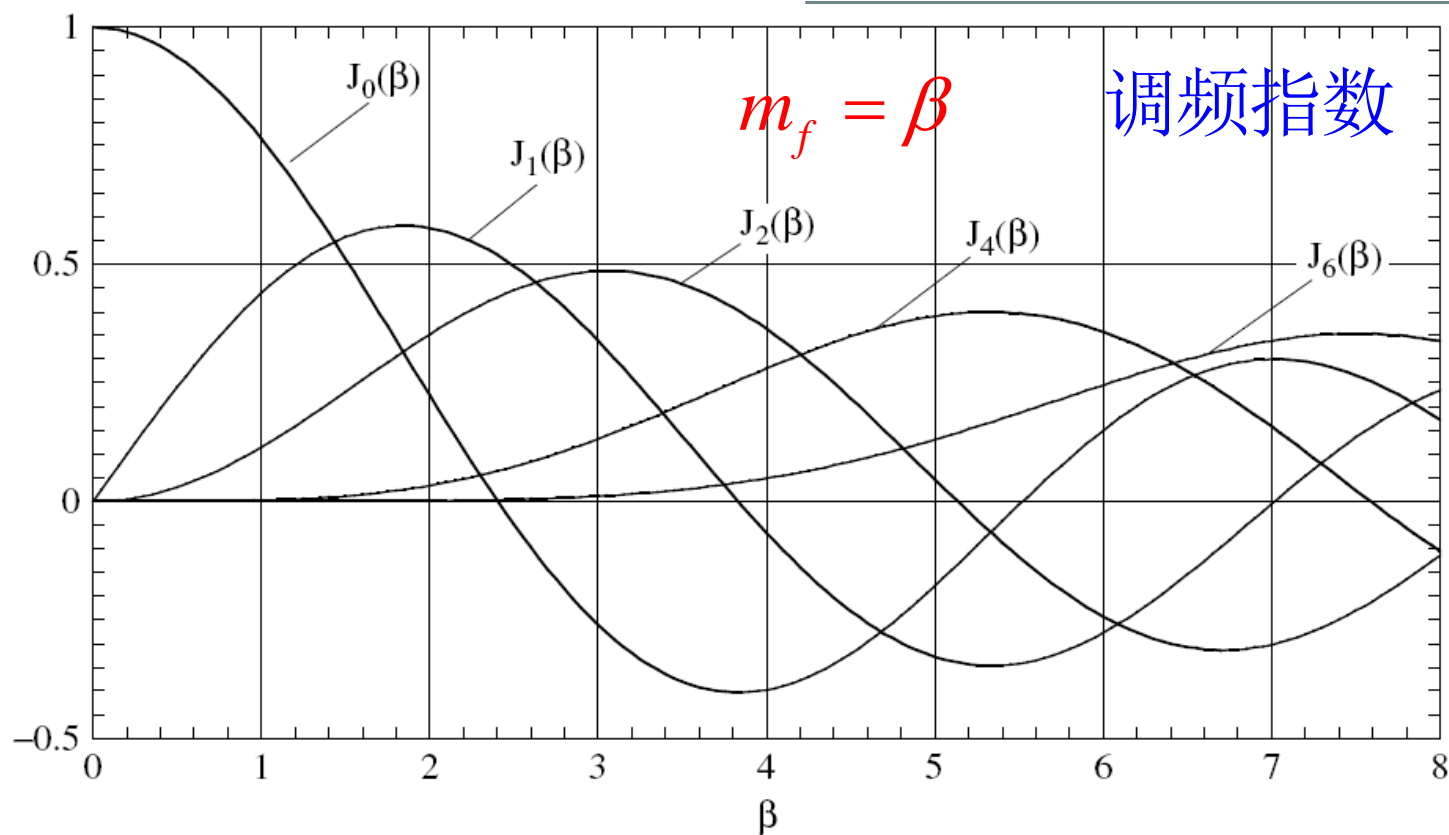
西安电子科技大学

通信工程学院

三、调频信号的带宽

$$J_n(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp[-j(n\theta - x \sin \theta)] d\theta$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(x) = 1 \quad \lim_{n \rightarrow \infty} |J_n(x)| = 0$$



班学



4.3 角调制（非线性调制）的原理

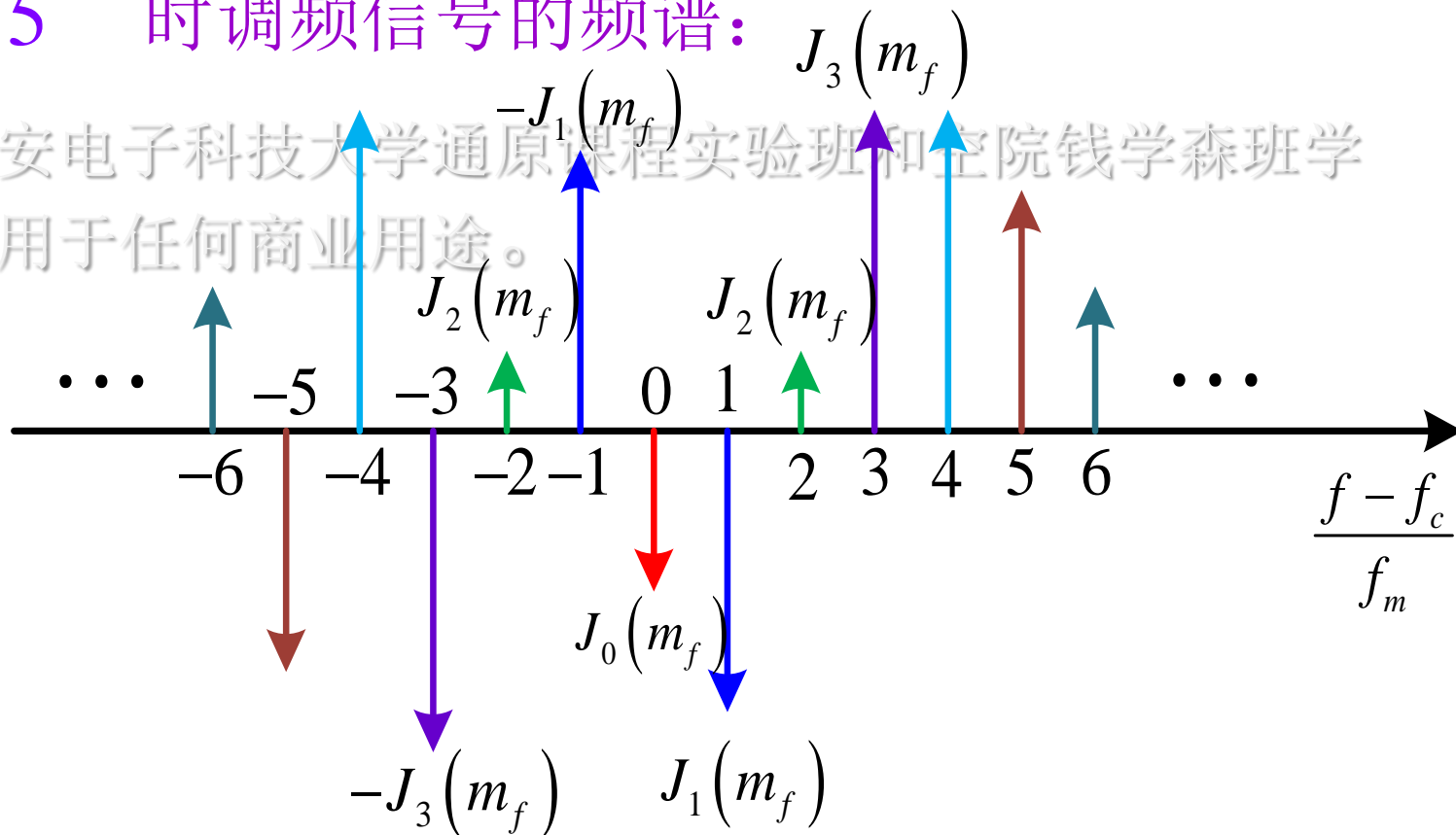
西安电子科技大学

通信工程学院

三、调频信号的带宽

$$s_{FM}(t) = A \cos(\omega_c t + m_f \sin \omega_m t) = A \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m_f) \cos(\omega_c + n\omega_m)t$$

$m_f = 5$ 时调频信号的频谱:



本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



4.3 角调制（非线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

三、调频信号的带宽

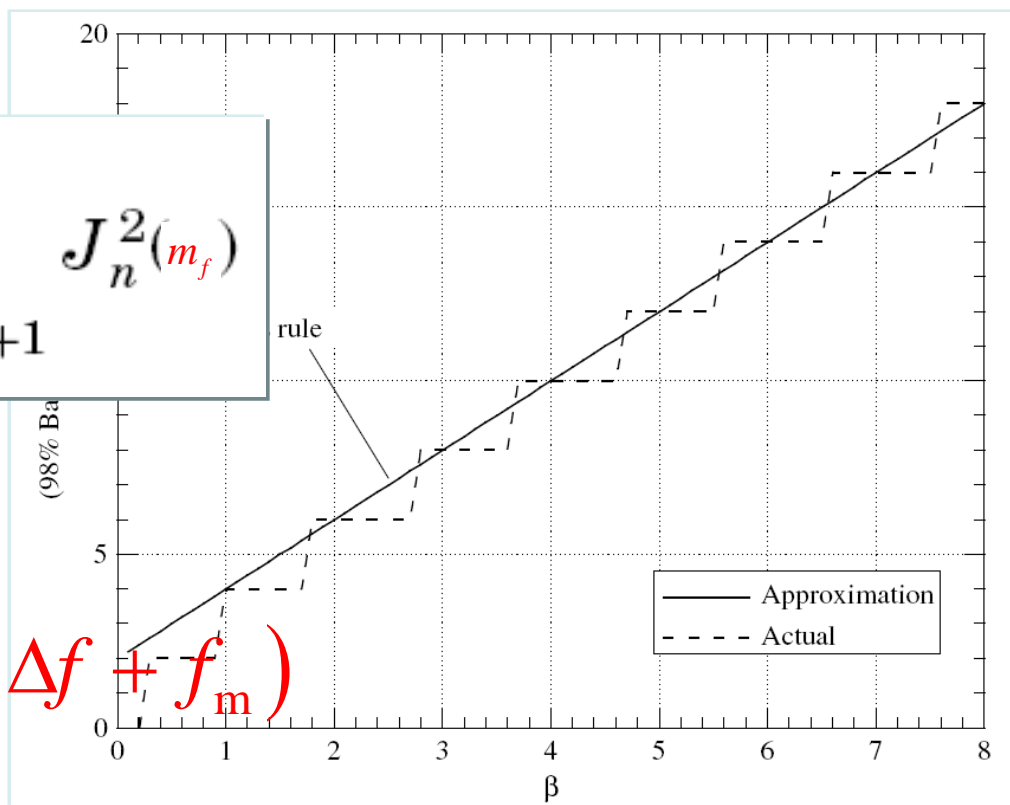
调频信号的带宽定义：包含信号能量的**98%**的带宽

$m_f = \beta$ 调频指数

$$\sum_{n=-K}^K J_n^2(m_f) > 0.98 \geq \sum_{n=-K+1}^{K-1} J_n^2(m_f)$$

卡森公式

$$B_{FM} = 2(m_f + 1)f_m = 2(\Delta f + f_m)$$





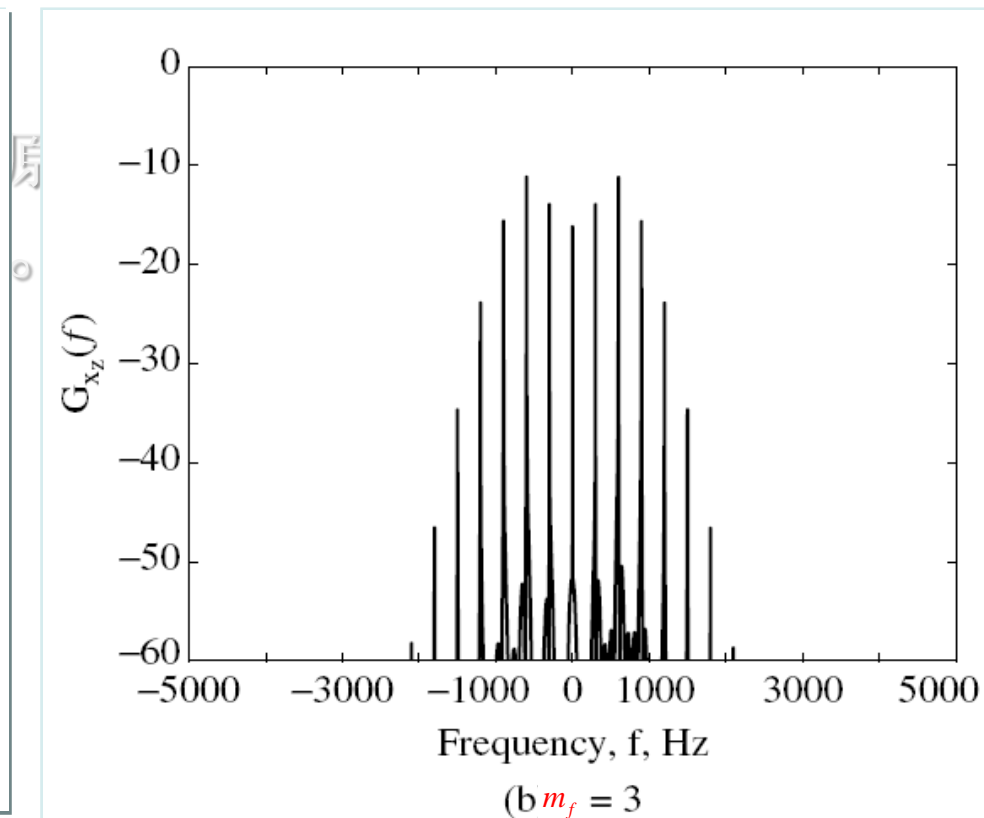
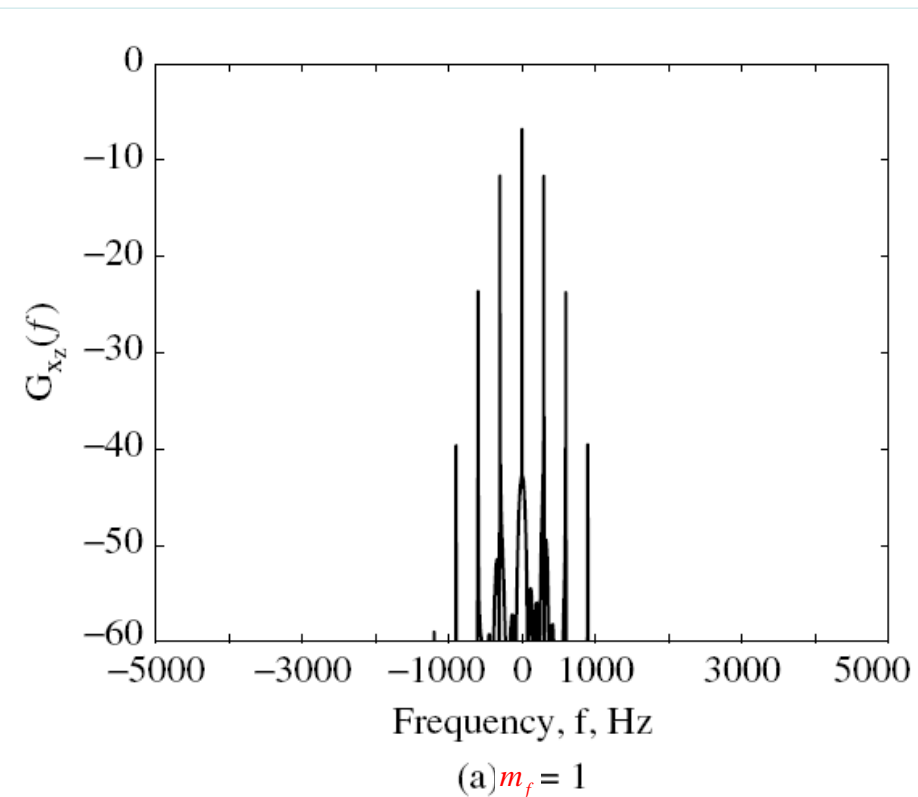
4.3 角调制（非线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

三、调频信号的带宽

$f_m=300\text{Hz}$, 调制指数分别为1和3信号的频谱





4.3 角调制（非线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

三、调频信号的带宽

① 频谱以 ω_c 为中心，两边有无穷多对边频分量，其幅度正比于 $J_n(m_f)$ 。

② 卡森公式 $B_{FM} = 2(m_f + 1)f_m = 2(\Delta f + f_m)$

若 $m_f \ll 1$ 时, $B_{FM} \approx 2f_m$ NBFM

$m_f \gg 1$ 时, $B_{FM} \approx 2\Delta f$ WBFM

③ 对任意带限的调制信号:

$$B_{FM} = 2(m_f + 1)f_{\max} \quad m_f = \frac{\Delta f}{f_{\max}}$$



4.3 角调制（非线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

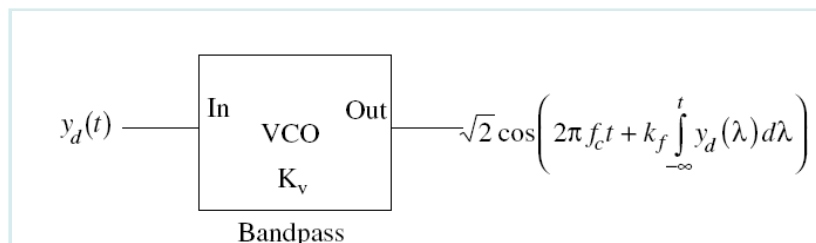
四、调频信号的调制与解调

1. 调制

压控振荡器调制

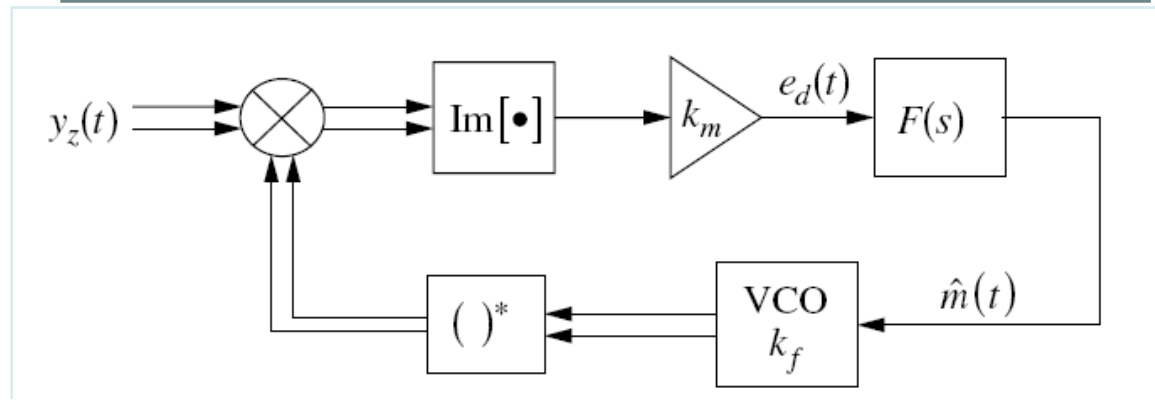
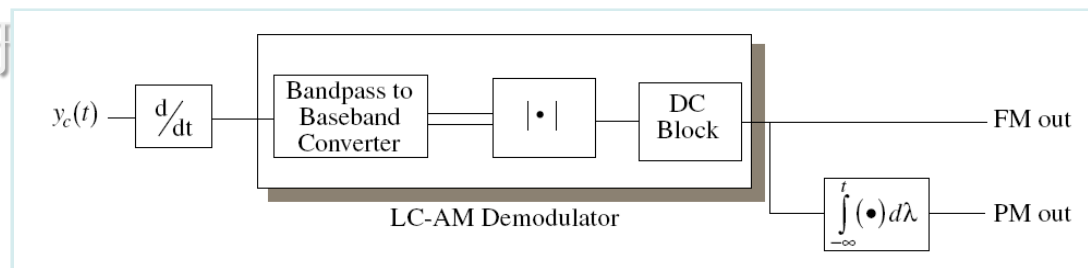
PLL调制

正交调制



2. 解调

鉴频等
非相干
解调





4.3 角调制（非线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

五、调频信号的抗噪性能

◎大信噪比时：

$$G_{FM} = 3m_f^2 (m_f + 1)$$

◎小信噪比时：门限效应

◎可通过增加传输带宽来改善抗噪声性能，但并不是无止境的。

本文件仅供西安电子科技大学通信工程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



4.3 角调制（非线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

【例】已知某单频调频波的振幅是10V，瞬时频率为 $f(t) = 10^6 + 10^4 \cos 2\pi \times 10^3 t$ (Hz)

(1) 写出此调频波的表达式；

(2) 此调频波的最大频率偏移、调频指数和频带宽度；

(3) 调制信号频率提高到 $2 \times 10^3 \text{ Hz}$ ，则调频波的最大频偏、调频指数和频带宽度如何变化？



4.3 角调制（非线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

解： (1) $\omega(t) = 2\pi f(t) = 2\pi \times 10^6 + 2\pi \times 10^4 \cos 2\pi \times 10^3 t$

$$\theta(t) = \int \omega(t) dt = 2\pi \times 10^6 t + 10 \sin 2\pi \times 10^3 t$$

$$s_{FM}(t) = A \cos \theta(t)$$

$$= 10 \cos(2\pi \times 10^6 t + 10 \sin 2\pi \times 10^3 t)$$

$$(2) \Delta f = 10 \text{ kHz}$$

$$m_f = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{10^4}{10^3} = 10$$

$$B_{FM} = 2(\Delta f + f_m) = 22 \text{ kHz}$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



4.3 角调制（非线性调制）的原理

西安电子科技大学

通信工程学院

The most common example of high fidelity audio transmission in the United States is FM broadcasting. FM broadcasting in the United States usually refers to transmissions confined to a band from 88 MHz to 108 MHz. The channels are set up to have center

frequencies spaced at 200 kHz spacings and the US Federal Communications Commission (FCC) allows each station to use about 180 kHz of bandwidth ($B_T = 180$ kHz). Since a high fidelity audio has a bandwidth of around $W = 15$ kHz, FM broadcast in the United States achieves a bandwidth efficiency of

$$E_B = \frac{15}{180} = 8.3\%$$

习使用，不得用于任



4.4 模拟调制系统的性能比较

西安电子科技大学

通信工程学院

假设所有系统以下参数相同：

解调器输入信号功率： S_i

噪声单边功率谱密度： n_0

基带信号带宽： f_m

其中AM信号为100%调制，且调制信号为单频正弦波



4.4 模拟调制系统的性能比较

西安电子科技大学

通信工程学院

调制方式	信号带宽	制度增益	S_o / N_o	复杂度	主要应用
DSB	$2f_m$	2	$\frac{S_i}{n_0 f_m}$	中等	较少
SSB	f_m	1	$\frac{S_i}{n_0 f_m}$	复杂	短波广播、话音频分多路
VSB	略大于 f_m	近似SSB	近似SSB	复杂	商用电视广播
AM	$2f_m$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3} \frac{S_i}{n_0 f_m}$	简单	中短波无线广播
FM	$2(m_f + 1)f_m$	$3m_f^2(m_f + 1)$	$\frac{3}{2} m_f^2 \frac{S_i}{n_0 f_m}$	中等	调频立体声广播

本
习

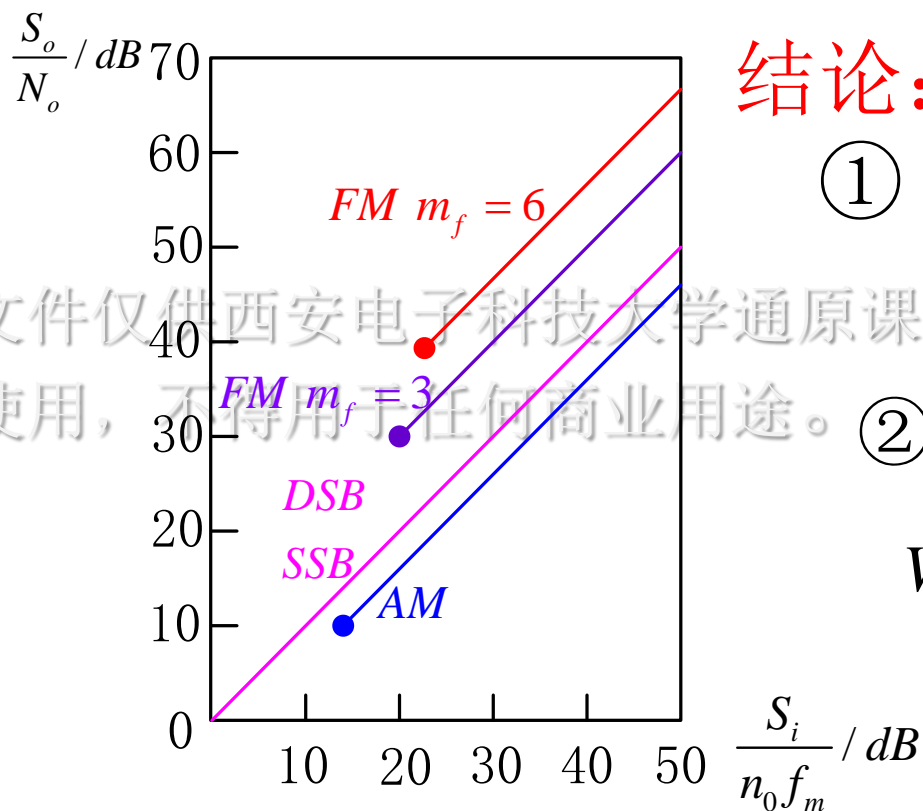


4.4 模拟调制系统的性能比较

西安电子科技大学

通信工程学院

各种模拟调制系统的性能曲线：



结论：

① $B_{FM} > B_{DSB} = B_{AM} > B_{VSB} > B_{SSB}$

且 $m_f \uparrow \Rightarrow B_{FM} \uparrow$

② 抗噪声性能

$WBFM > DSB = SSB > AM$



4.5 频分复用

西安电子科技大学

通信工程学院

一、复用

将多个彼此独立的信号合并成一个复合信号,并在同一个信道中传输。

二、复用技术分类

- 1、频分复用
- 2、时分复用
- 3、码分复用

三、FDM的原理

本文件仅供西安电子科技大学原课程实验班和空院钱学森班学习使用,不得用于任何商业用途。

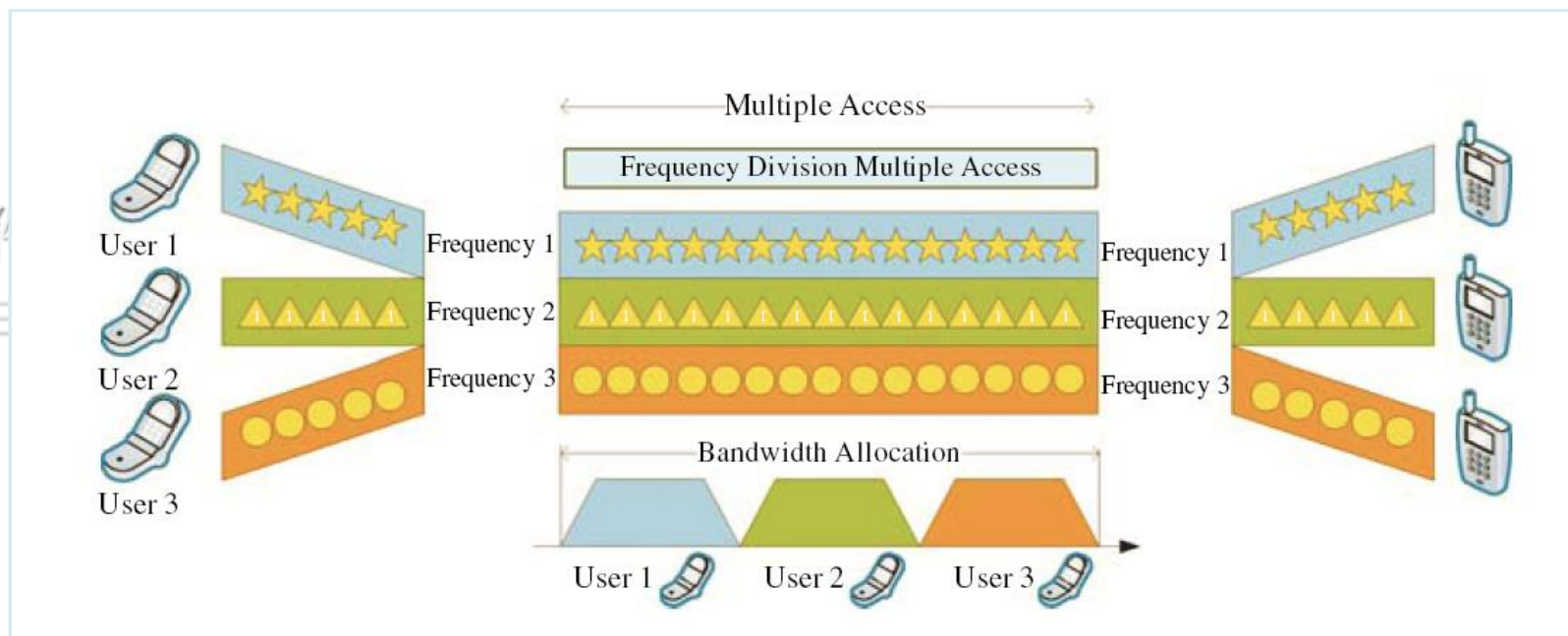


4.5 频分复用

西安电子科技大学

通信工程学院

三、FDM的原理



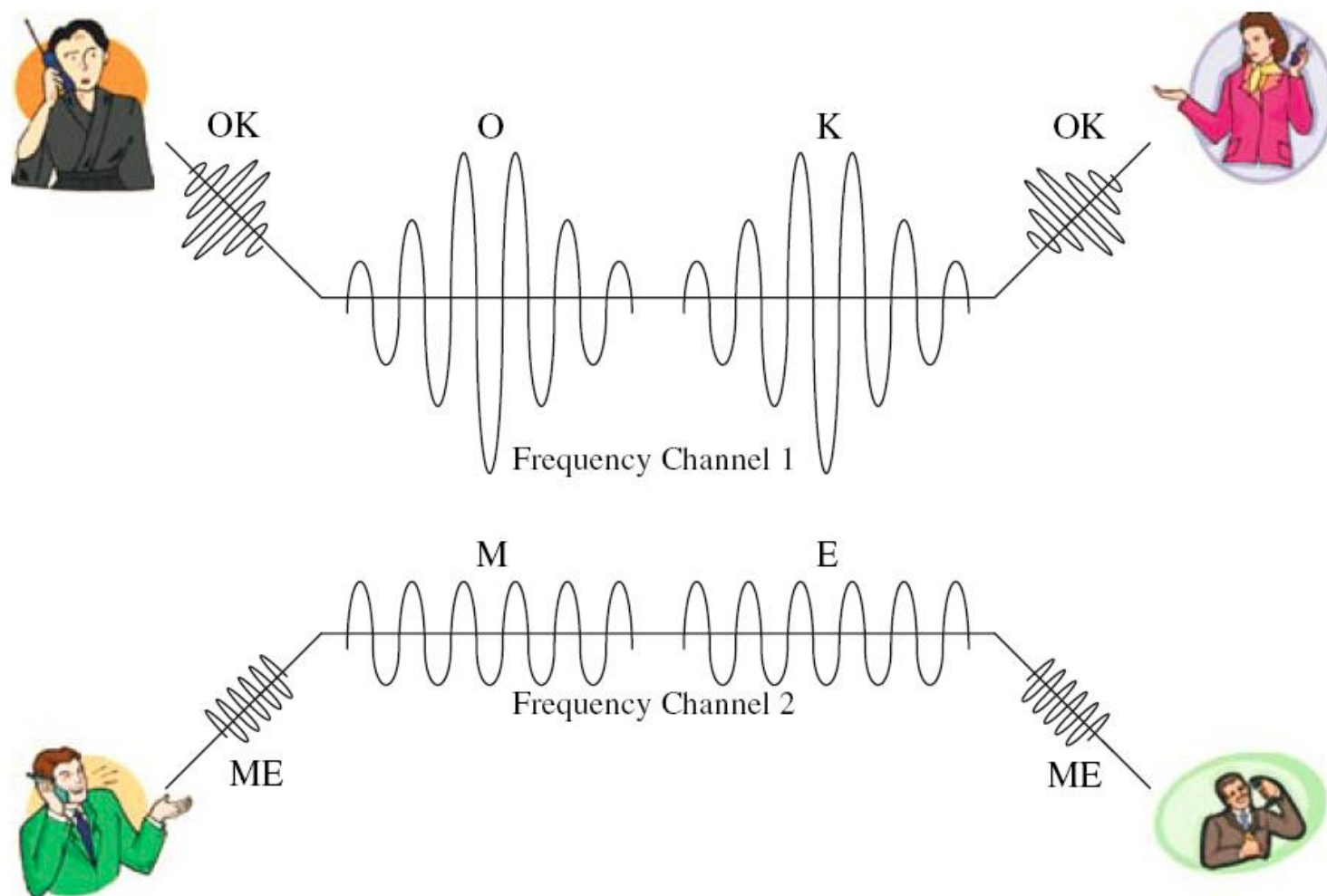


4.5 频分复用

西安电子科技大学

通信工程学院

三、FDM的原理



本文
习使

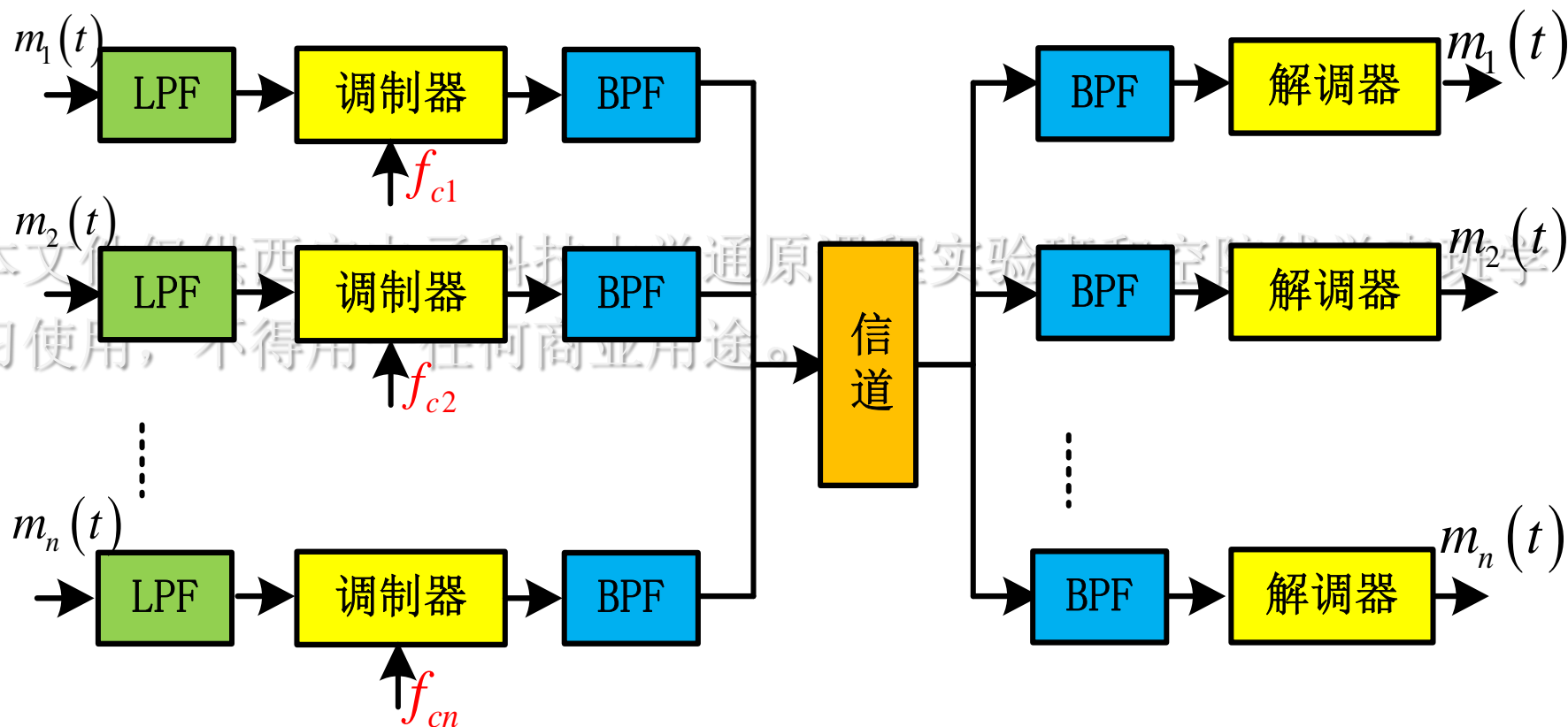


4.5 频分复用

西安电子科技大学

通信工程学院

频分复用系统原理图：



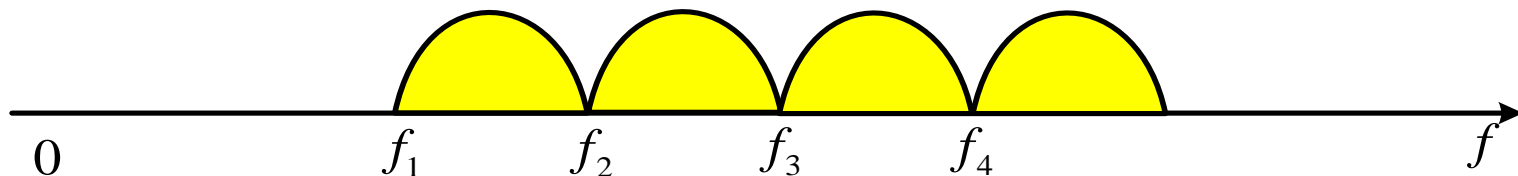


4.5 频分复用

西安电子科技大学

通信工程学院

复用信号频谱结构示意图：



n路单边带信号带宽：

$$B = nf_m + (n-1)f_g$$

四、模拟电话多路复用系统

12路→1个基群

5个基群→1个超群

10个超群→1个主群

每路电话信号的标准带宽：4KHz



4.5 频分复用

西安电子科技大学

通信工程学院

The most common example of high fidelity audio transmission in the United States is FM broadcasting. FM broadcasting in the United States usually refers to transmissions confined to a band from 88 MHz to 108 MHz. The channels are set up to have center frequencies spaced at 200 kHz spacings and the US Federal Communications Commission (FCC) allows each station to use about 180 kHz of bandwidth ($B_T = 180$ kHz). Since a high fidelity audio has a bandwidth of around $W = 15$ kHz, FM broadcast in the United States achieves a bandwidth efficiency of

$$E_B = \frac{15}{180} = 8.3\%$$

The most common example of voice transmission in the United States is AM broadcasting. AM broadcasting in the United States usually refers to transmissions confined to a band from 535 kHz to 1,700 kHz. The channels are set up to have center frequencies spaced at 10 kHz spacings and the US Federal Communications Commission (FCC) allows each station to use about 8 kHz of bandwidth ($B_T = 8$ kHz). Since each voice band signal has a bandwidth of around $W = 4$ kHz, AM broadcast in the United States achieves a bandwidth efficiency of

$$E_B = \frac{4}{8} = 50\%$$

本文件仅供西安电子
习使用，不得用于任

程实验班和空院钱学森班学



第4章 模拟调制系统

西安电子科技大学

通信工程学院

【例】发射信号 $s_m(t) = [A_0 + m(t)] \cos \omega_c t$,

$m(t)$: $f_H = 5\text{kHz}$, $\overline{m^2(t)} = 500\text{W}$, $f_c = 100\text{kHz}$,

载波功率为1000W, 噪声单边功率谱密度为

10^{-10}W/Hz , 信道衰减70dB, BPF高为1宽为B。

(1)确定BPF中心频率 f_0 和带宽B;

(2)计算解调器输入信噪比;

(3)计算解调器输出信噪比和调制制度增益。





第4章 模拟调制系统

西安电子科技大学

通信工程学院

解： (1) $f_0 = 100\text{kHz}$, $B = 2 \times 5 = 10\text{kHz}$

$$(2) S_T = \frac{A_0^2}{2} + \frac{\overline{m^2(t)}}{2} = 1000 + 250 = 1250\text{W}$$

$$S_i = S_T / L = 1250 / 10^7 = 125\mu\text{W}$$

$$N_i = n_0 B = 10^{-10} \times 10^4 = 1\mu\text{W}$$

$$\frac{S_i}{N_i} = 125$$

$$(3) \because \frac{S_i}{N_i} = 125 \gg 1$$

$$\therefore G_{AM} = \frac{\overline{2m^2(t)}}{A_0^2 + \overline{m^2(t)}} = 0.4$$

$$\frac{S_o}{N_o} = 0.4 \frac{S_i}{N_i} = 50$$



本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



第4章 模拟调制系统

西安电子科技大学

通信工程学院

【例】假设 $m(t)$ 调制后在信道中传输，要求接收机

$S_o / N_o = 40dB$ ，已知由发射机到解调器输入端总损耗
 $60dB$ ， $n_0 / 2 = 10^{-12} W / Hz$ ，为

$m(t): f_{\max} = 5kHz, \overline{m(t)} = 0, \overline{m^2(t)} = 0.5, |m(t)|_{\max} = 1$

(1) SSB调制发射机输出功率（相干解调）

(2) 100%AM调制发射机输出功率（非相干解调）

(3) $m_f = 5$ 的FM调制发射机输出功率（非相干解调）



第4章 模拟调制系统

西安电子科技大学

通信工程学院

分析:

$$\left. \frac{S_o}{N_o} \right\} \Rightarrow \left. \frac{S_i}{N_i} \right\} \Rightarrow \left. \frac{S_i}{L} \right\} \Rightarrow S_T$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



第4章 模拟调制系统

西安电子科技大学

通信工程学院

【例】AM信号： $s_{AM}(t) = [A_0 + m(t)] \cos \omega_c t$ ，采用包络

检波法解调，噪声双边功率谱密度为 $5 \times 10^{-5} \text{ mW / Hz}$ ，

信号载波功率为100mW，每边带功率为10mW，BPF带宽

为4KHz。

(1)画出AM调制与解调框图；

(2)计算 $\frac{S_i}{N_i}$ ， $\frac{S_o}{N_o}$ ；

(3)该系统调制制度增益与DSB系统的关系。



第4章 模拟调制系统

西安电子科技大学

通信工程学院

解：(2) $S_i = \frac{A_0^2}{2} + \frac{\overline{m^2(t)}}{2} = 100 + 10 \times 2 = 120mW$

$$N_i = n_0 B = 2 \times 5 \times 10^{-5} \times 4000 = 0.4mW$$

$$\frac{S_i}{N_i} = 300 \gg 1 \quad \therefore G_{AM} = \frac{\overline{2m^2(t)}}{A_0^2 + \overline{m^2(t)}} = \frac{1}{3}$$

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{1}{3} \frac{S_i}{N_i} = 100$$

$$(3) \frac{G_{DSB}}{G_{AM}} = \frac{2}{1/3} = 6$$

本文件仅供西安电子科技大学通信工程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。