第5章 模拟调制系统

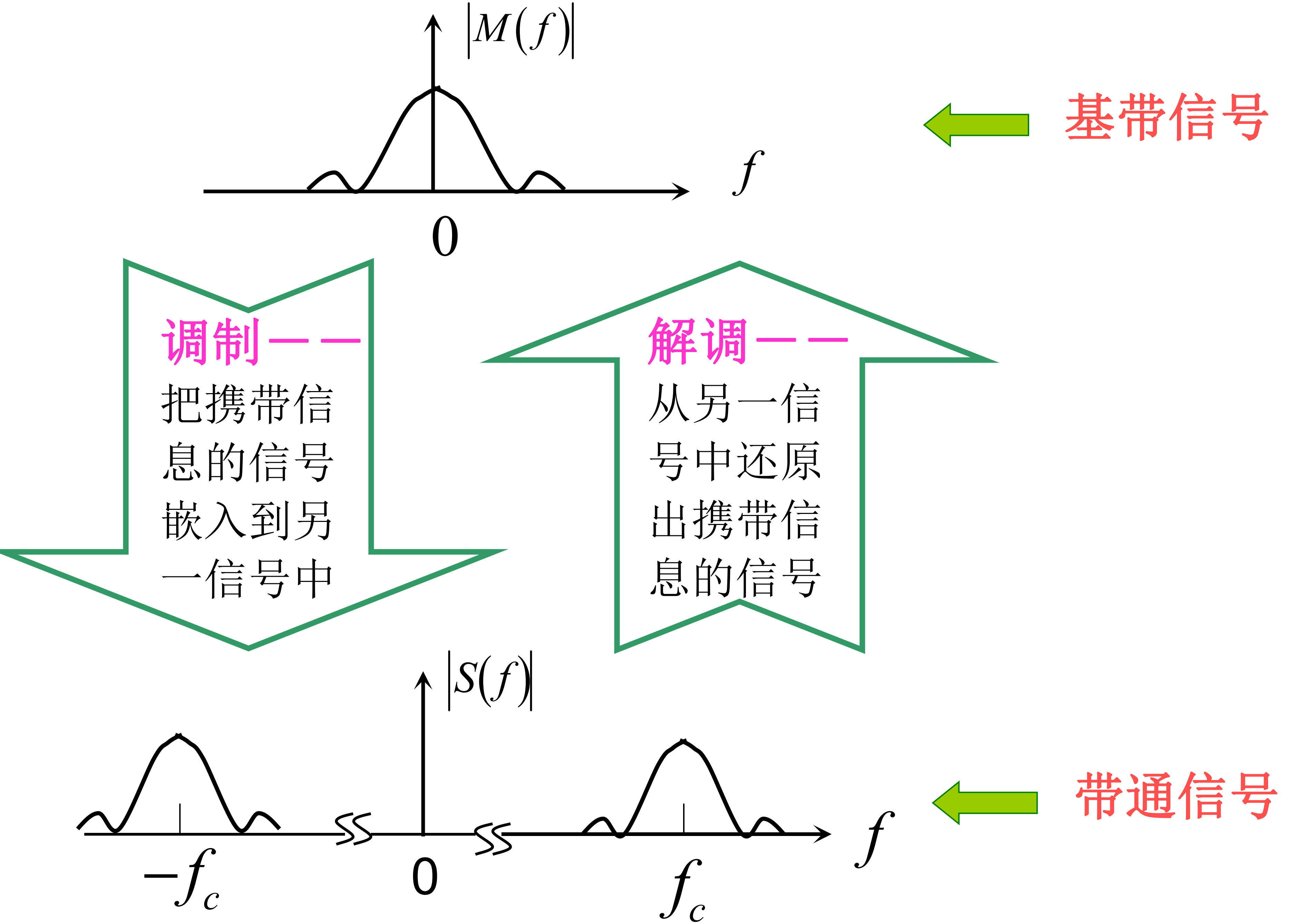
核心内容----模拟信号的调制、解调

5.1 幅度调制（线性调制）的原理

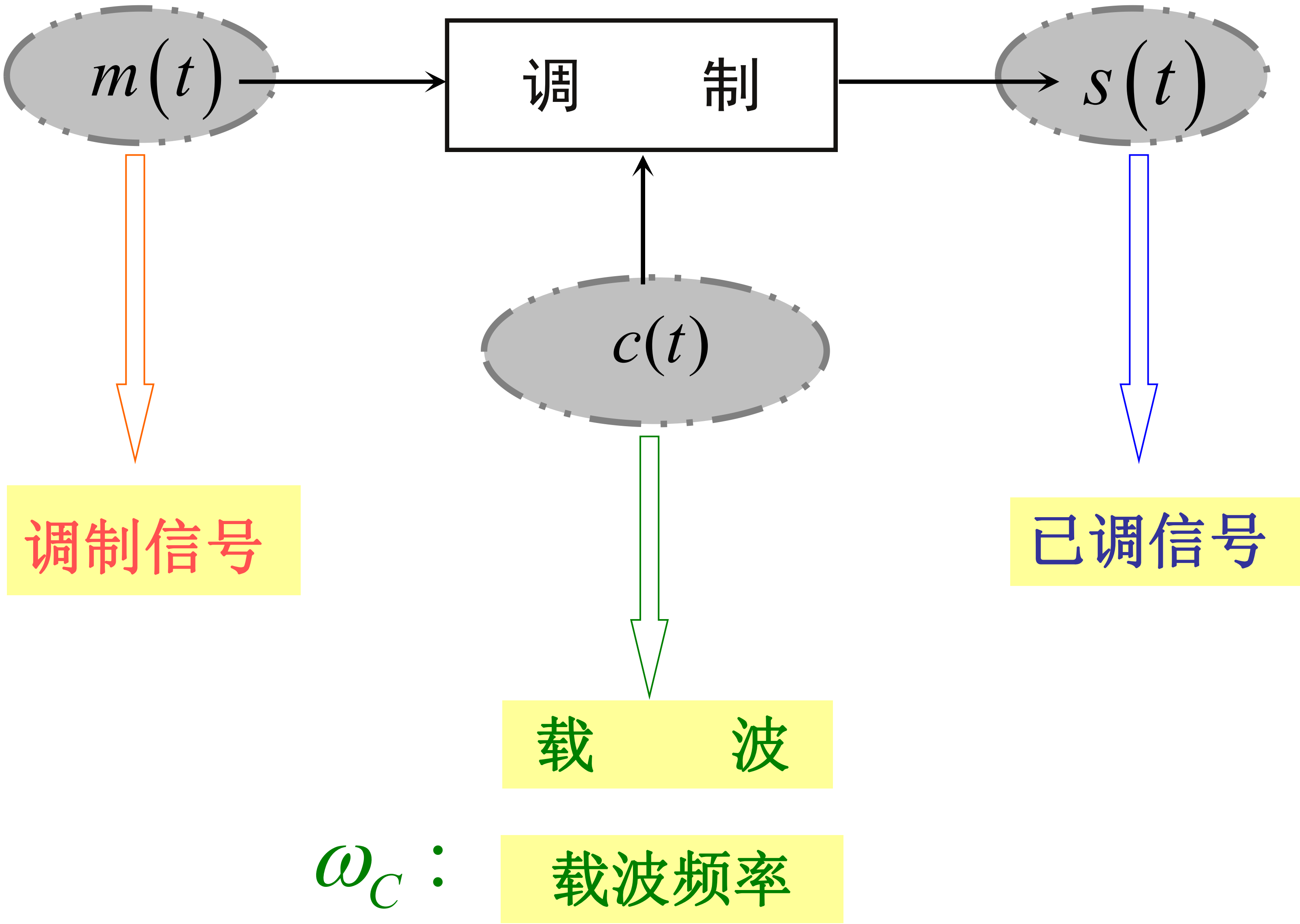
5.2 角度调制（非线性调制）原理

5.3 各种模拟调制系统的比较

5.4 频分复用



|M(f)|
f
0
基带信号
调制——
把携带信息的信号嵌入到另一信号中
解调——
从另一信号中还原出携带信息的信号
|S(f)|
−f_c
0
f_c
f
带通信号


$m(t)$
调　制
$s(t)$
$c(t)$
调制信号
已调信号
载　波
ω_C：
载波频率

调制和解调

★ 作　用

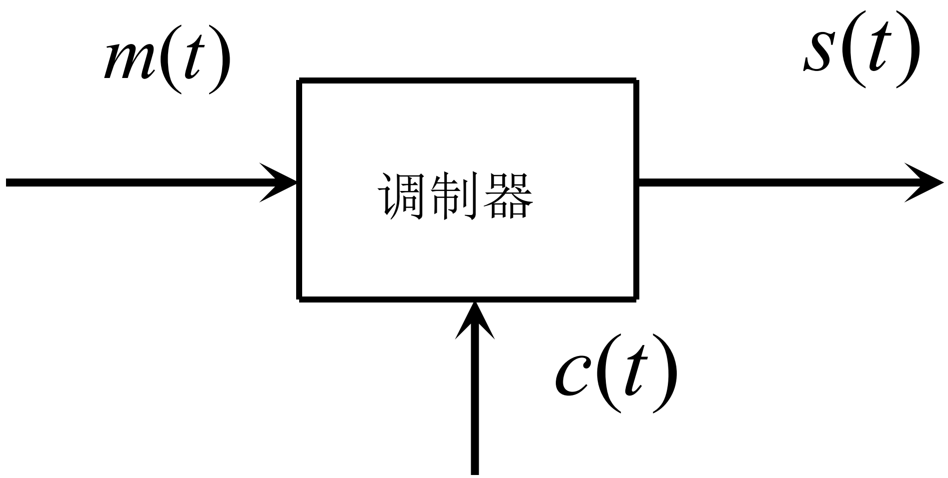
√ 搬移基带信号频谱

√ 容易辐射

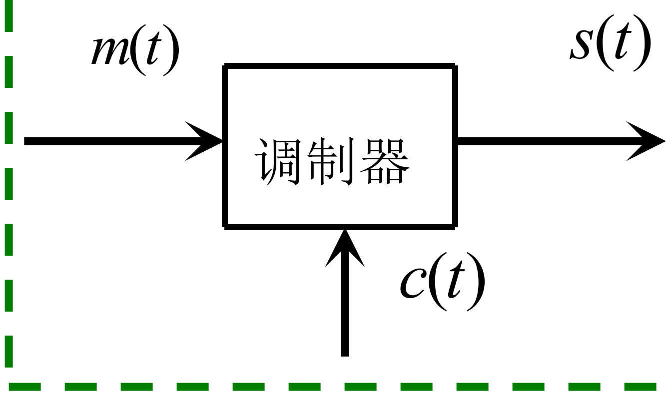
√ 实现频率分配

√ 实现多路复用

√ 提高系统抗干扰能力



★分　类



√根 据 m(t) 的 不 同

模拟调制--- 以单音正弦波为代表

数字调制--- 以二进制数字脉冲为代表

√根 据 c(t) 的 不 同

连续载波调制---以单频正弦波为代表

脉冲载波调制--- 以矩形周期脉冲为代表

√ 根 据 调 制 器 的 功 能 不 同

幅度调制---如AM、PAM、OOK

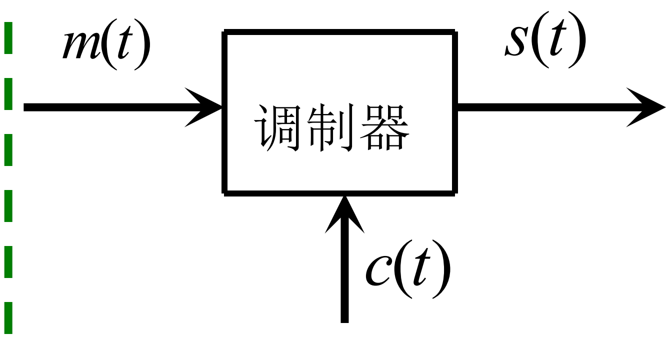
频率调制---如FM 、 PFM 、 FSK

相位调制---如PM 、 PPM 、PSK

√ 根据频谱搬移特性的不同

线性调制---如AM、DSB-SC、SSB

非线性调制---如PCM、FM、FSK



★参 数

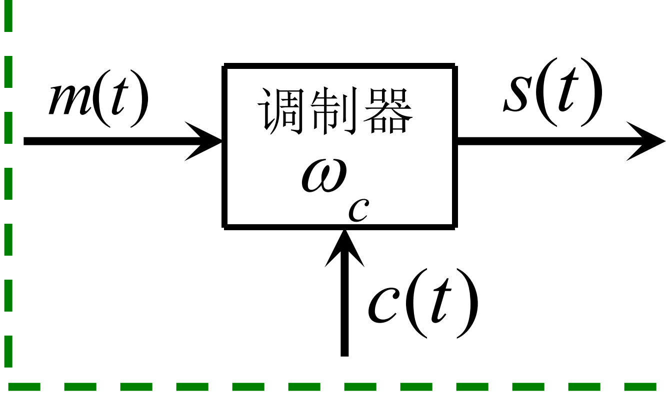
√**发送功率**

√**传输带宽**

√**抗噪声性能**

√**设备的复杂性**

已调带通信号的复包络表达式：



$$s(t)=\mathrm{Re}\left\{\, s_L(t)e^{j\omega_c t} \,\right\}$$

已调信号的频谱：

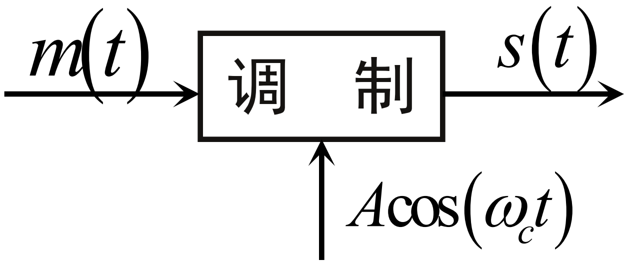
$$S(f)=\frac{1}{2}\left[S_L(f-f_c)+S_L{}^*(-f-f_c)\right]$$

已调信号的功率谱：

$$\Re_s(f)=\frac{1}{4}\left[\Re_{s_L}(f-f_c)+\Re_{s_L}(-f-f_c)\right]$$

5.1 幅度调制的原理

幅度调制----用信号去迫使高频载波瞬时幅度变化。



- 模拟常规调幅（**AM**）
- 抑制载波双边带调幅（**DSB-SC**）
- 单边带调幅（**SSB**）

5.1.1 常规调幅AM

1. AM信号的时域分析

(1) 表达式

$$s_{AM}(t) = \left[A_0 + m(t)\right]\cos\left(2\pi f_c t\right)$$

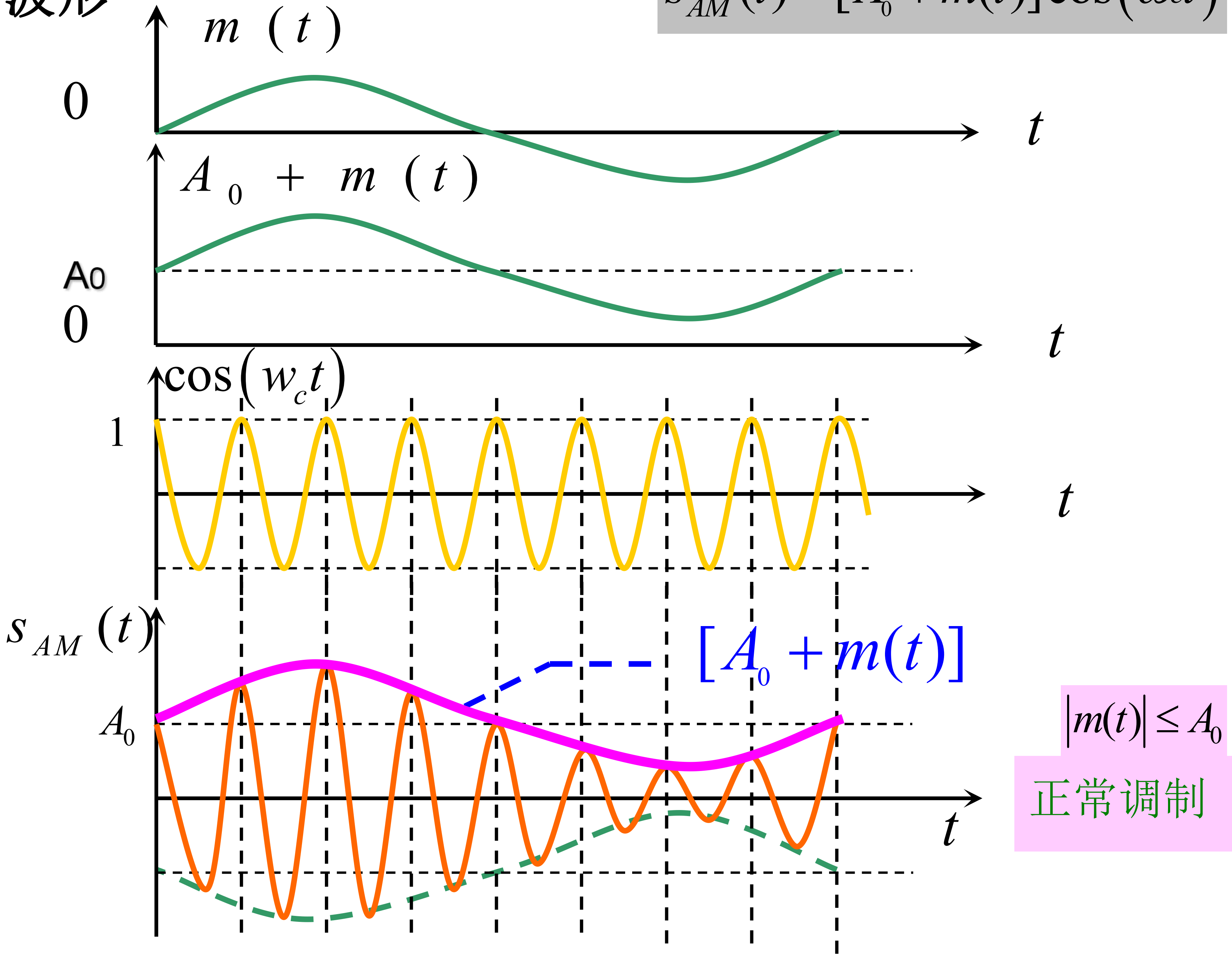
直流偏量

消息信号(调制信号)

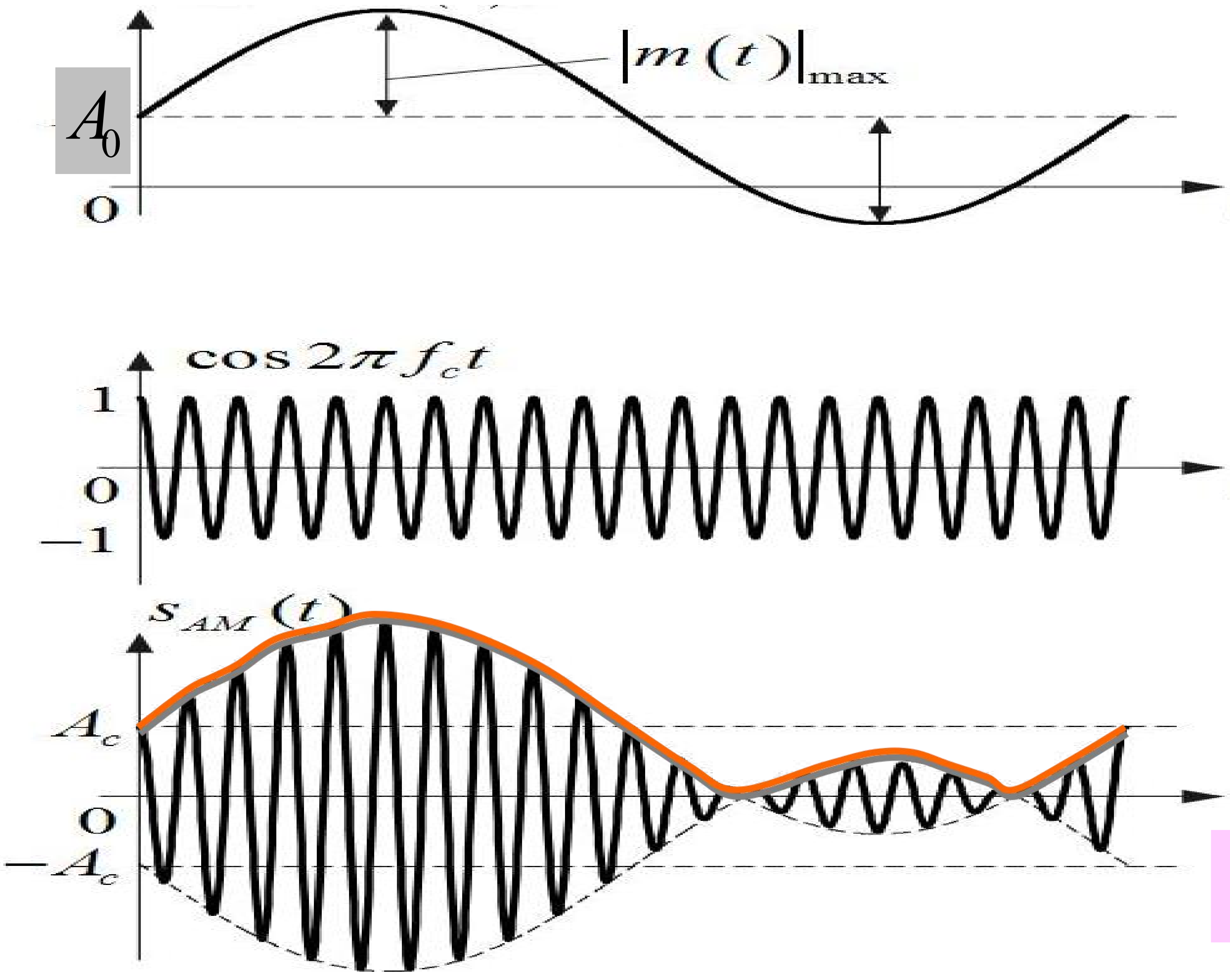
确知信号或随机信号

(2) 波形

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



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



$|m(t)|>A_0$

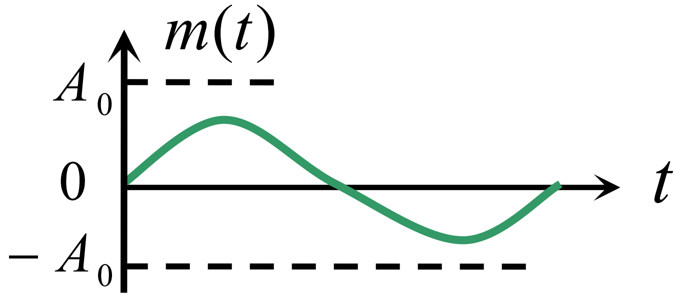
过调制

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

(3) 调幅指数

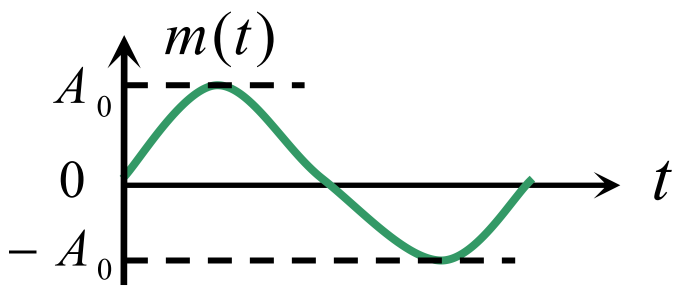
$$\beta_{AM}=\frac{|m(t)|_{\max}}{A_0}$$

$\beta_{AM}<1$



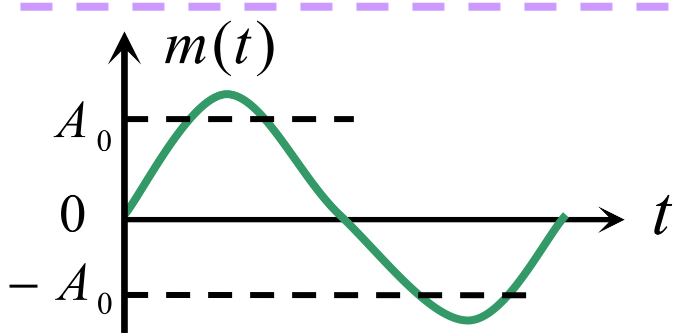
正常调制

$\beta_{AM}=1$



临界调制

$\beta_{AM}>1$



过调制

(4) 功率分配

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

$$P_{AM}=\overline{s_{AM}^2(t)}\qquad=\overline{\left[A_0+m(t)\right]^2\cos^2(\omega_c t)}$$

$$=\overline{A_0^2\cos^2(\omega_c t)}+\overline{m^2(t)\cos^2(\omega_c t)}+\overline{2A_0m(t)\cos^2(\omega_c t)}$$

$$=\overline{A_0^2\frac{1}{2}\left[1+\cos(2\omega_c t)\right]}+\overline{m^2(t)\frac{1}{2}\left[1+\cos(2\omega_c t)\right]}+\overline{A_0m(t)\left[1+\cos(2\omega_c t)\right]}$$

$$\approx\frac{A_0^2}{2}+\frac{\overline{m^2(t)}}{2}+A_0\overline{m(t)}$$

Often: $\boxed{\overline{m(t)}=0}$

$$=\underbrace{\frac{1}{2}A_0^2}_{\text{离散载波功率}}+\underbrace{\frac{1}{2}\overline{m^2(t)}}_{\text{边带功率}}$$

$$\overline{x(t)}=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T}x(t)dt$$

2. AM信号的频域分析

(1) 频谱或功率谱

$$s_{AM}(t) = \left[A_0 + m(t)\right]\cos\left(2\pi f_c t\right)$$

$$= A_0 \cos\left(2\pi f_c t\right) + m(t)\cos\left(2\pi f_c t\right)$$

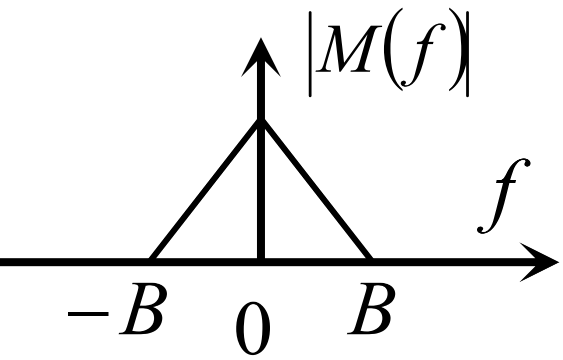
若m(t)为确知信号，则频谱为：

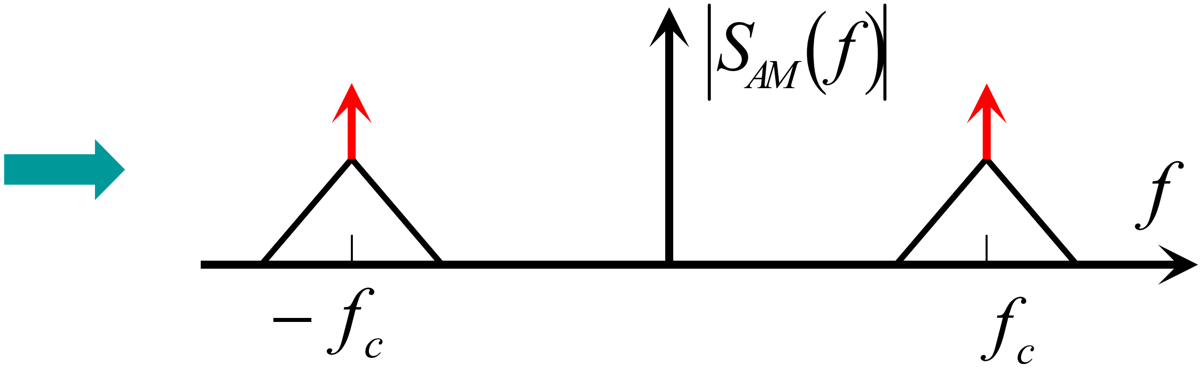
$$S_{AM}(f) = \frac{A_0}{2}\left[\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)\right] + \frac{1}{2}\left[M(f - f_c) + M(f + f_c)\right]$$

若m(t)为确知或随机信号，则功率谱为：

$$S_{AM}(f) = \frac{A_0^2}{4}\left[\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)\right] + \frac{1}{4}\left[P_m(f - f_c) + P_m(f + f_c)\right]$$

$$S_{AM}(f)=\frac{A_0}{2}\left[\delta(f-f_c)+\delta(f+f_c)\right]+\frac{1}{2}\left[M(f-f_c)+M(f+f_c)\right]$$





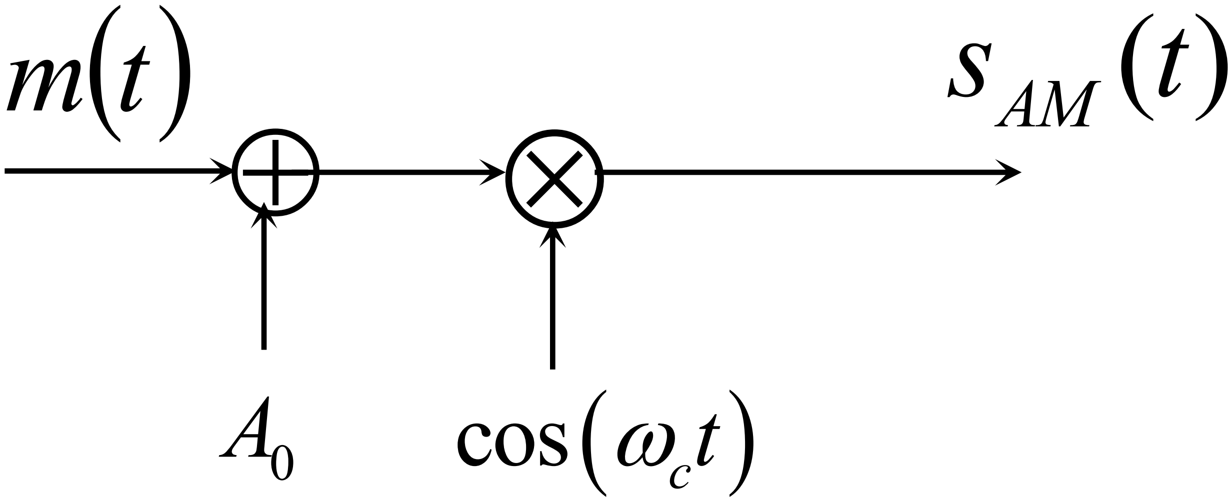
(2) 带宽

若调制信号的带宽为B，则对应的AM信号其带宽为：

$$B_{AM}=2B$$

3. AM信号的产生和接收

(1) 产生

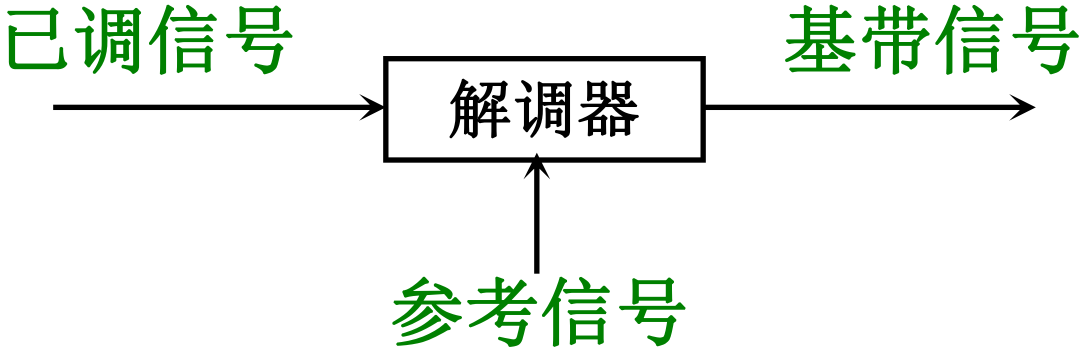


$$s_{AM}(t) = [A_0 + m(t)]\cos(\omega_c t)$$

(2) 接收

接收方式有如下两种：

相干解调 ⟶ 有**2**个输入

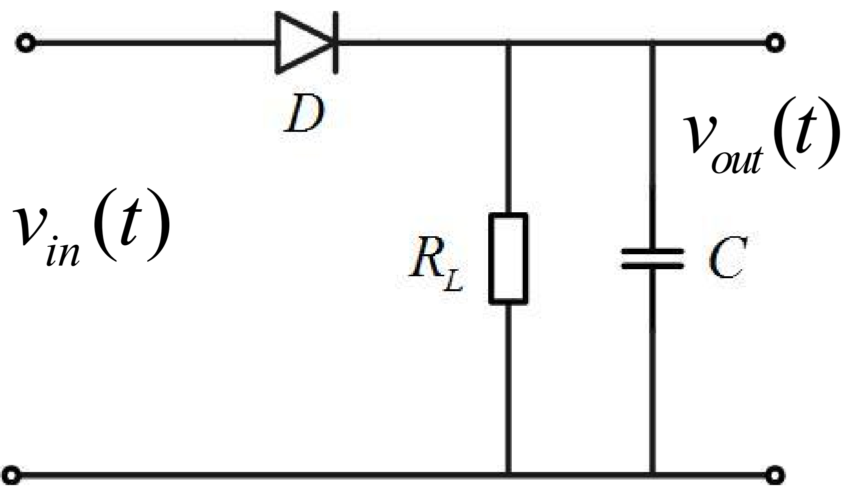


非相干解调 ⟶ 只有**1**个输入

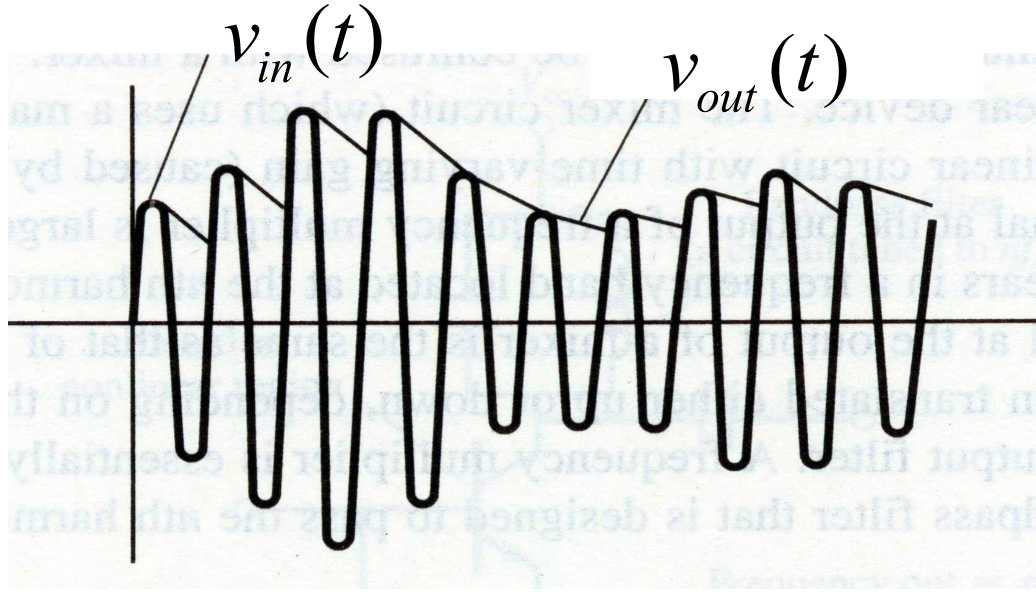
(2) 接收

√包络检波　（非相干解调）

(在$\beta_{AM} < 1$ 时，无失真恢复)



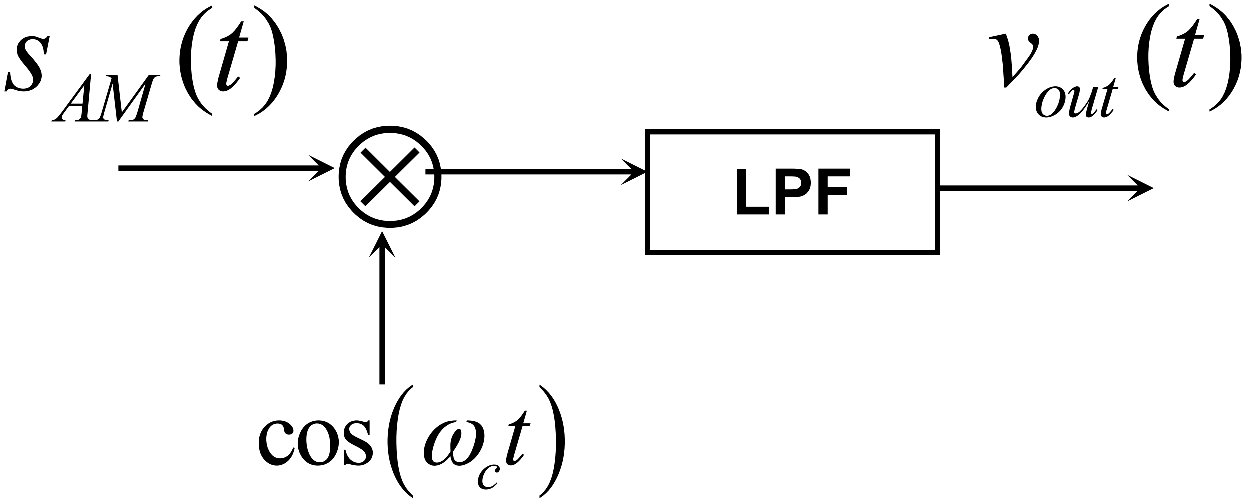
a. 检波电路



b. 输入输出波形

√乘积检波　　（相干解调）

(用于任何调幅指数调制的无失真恢复)



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

5. 1. 2 抑制载波双边带调幅DSB-SC

1. DSB-SC信号的时域分析

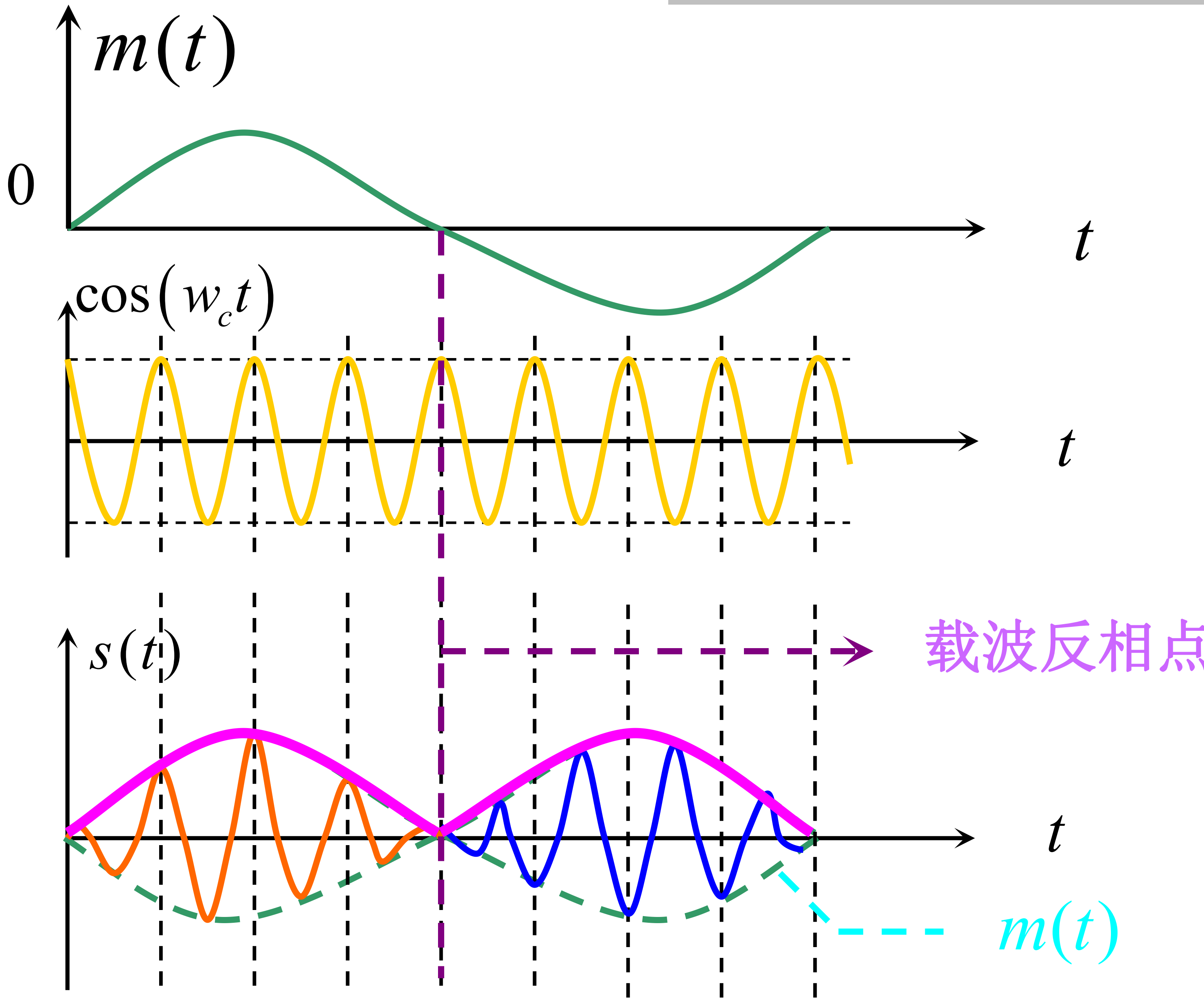
(1) 表达式

$$s_{DSB}(t) = m(t)\cos\left(2\pi f_c t\right)$$

消息信号

(2) 波形

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



$$s_{DSB}(t) = m(t)\cos\left(2\pi f_c t\right)$$

(3) 功率分配

$$P_{DSB} = \overline{s_{DSB}^2\left(t\right)}$$

$$= \overline{m^2\left(t\right)\cos^2\left(2\pi f_c t\right)}$$

$$= \frac{1}{2}\cdot\overline{m^2\left(t\right)}$$

2. DSB-SC信号的频域分析

(1) 频谱或功率谱

$$s_{DSB}(t)=m(t)\cos\left(2\pi f_c t\right)$$

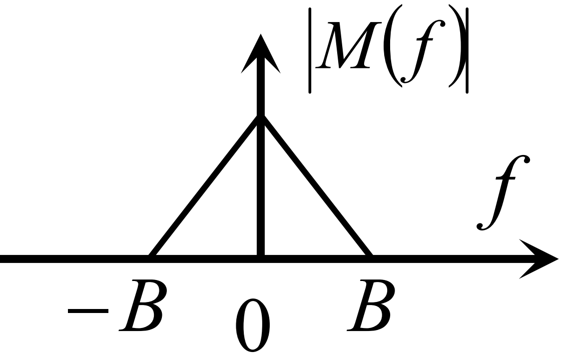
若m(t)为确知信号，则频谱为：

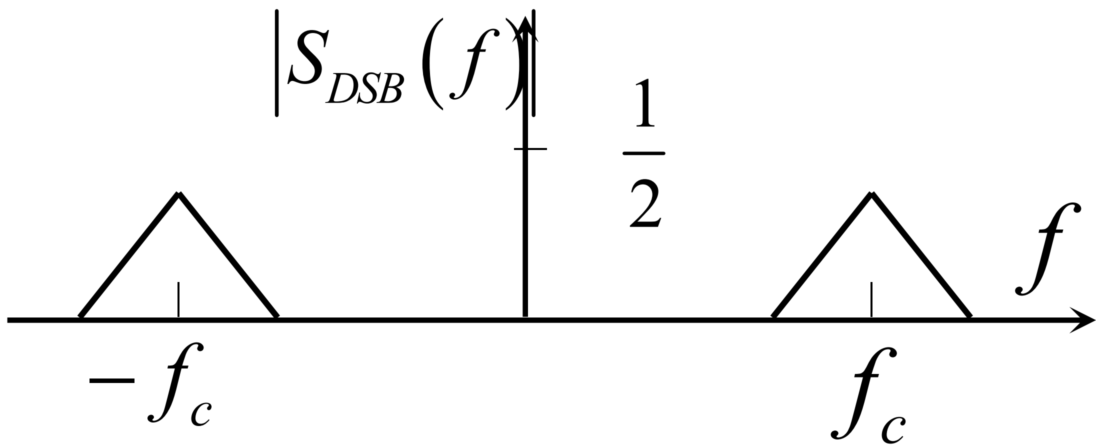
$$S_{DSB}(f)=\frac{1}{2}\left[M\left(f+f_c\right)+M\left(f-f_c\right)\right]$$

若m(t)为确知或随机信号，则功率谱为：

$$S_{DSB}(f)=\frac{1}{4}\left[P_m\left(f-f_c\right)+P_m\left(f+f_c\right)\right]$$

$$S_{DSB}(f) = \frac{1}{2}\left[M(f+f_c)+M(f-f_c)\right]$$





(2) 带宽

若调制信号带宽为B，则对应的DSB-SC信号其带宽为：

$$B_{DSB} = 2B$$

例：有DSB-SC信号为

$$\boxed{s(t) = 5\cos\left(300\pi t\right)\cos\left(2000\pi t\right)}$$

试求：信号的功率谱、带宽、功率。

解： 由DSB-SC信号的通用表达式

$$s_{DSB}(t) = m(t)\cos\left(2\pi f_c t\right)$$

其中：

$$m(t) = 5\cos\left(2\pi f_m t\right)，\ f_m = 150Hz, f_c = 1000Hz$$

$$m(t)=5\cos(2\pi f_m t),\ f_m=150Hz, f_c=1000Hz$$

调制信号的功率谱为：

$$P_m(f)=\left(\frac{5}{2}\right)^2\left[\delta\left(f+f_m\right)+\delta\left(f-f_m\right)\right]$$

$$=\frac{25}{4}\left[\delta\left(f+150\right)+\delta\left(f-150\right)\right]$$

DSB-SC信号的功率谱为：

$$P_{DSB-SC}(f)=\frac{1}{4}[P_m(f+f_c)+P_m(f-f_c)]$$

$$=\frac{25}{16}[\delta(f+1150)+\delta(f+850)+\delta(f-850)+\delta(f-1150)]$$

$$m(t)=5\cos(2\pi f_m t),\ f_m=150Hz, f_c=1000Hz$$

带宽： $B_{DSB-SC}=2B_m=300Hz$

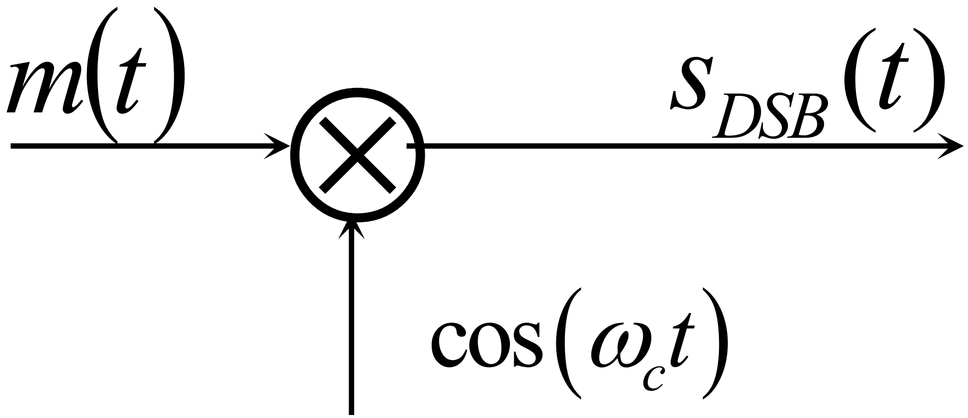
功率： $P_m=\dfrac{5^2}{2}=12.5W$

$$P_{DSB-SC}=P_m/2$$

$$=12.5/2=6.25W$$

3. DSB-SC信号的产生和接收

(1) 产生



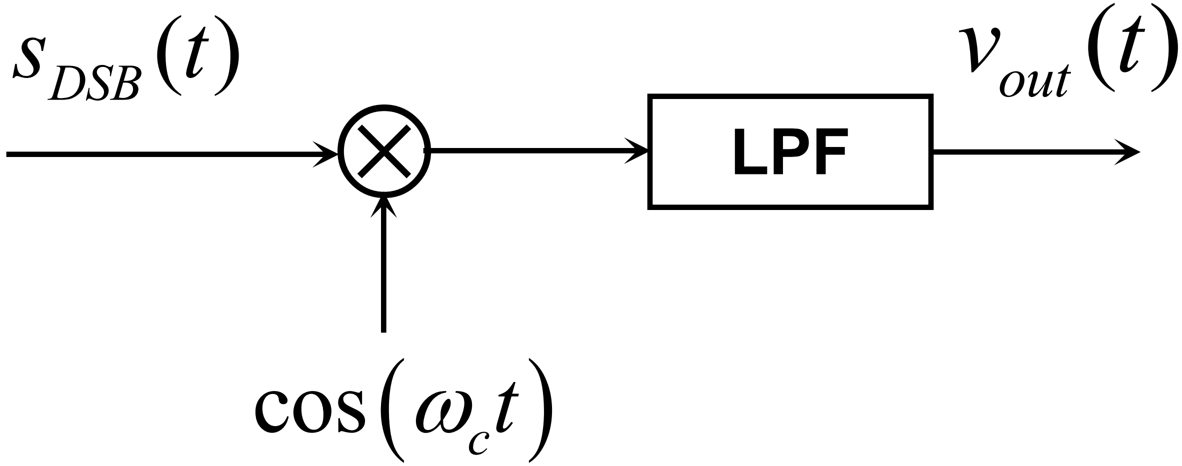
$$s_{DSB}(t) = m(t)\cos(\omega_c t)$$

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

(2) 接收

√乘积检波（相干解调）

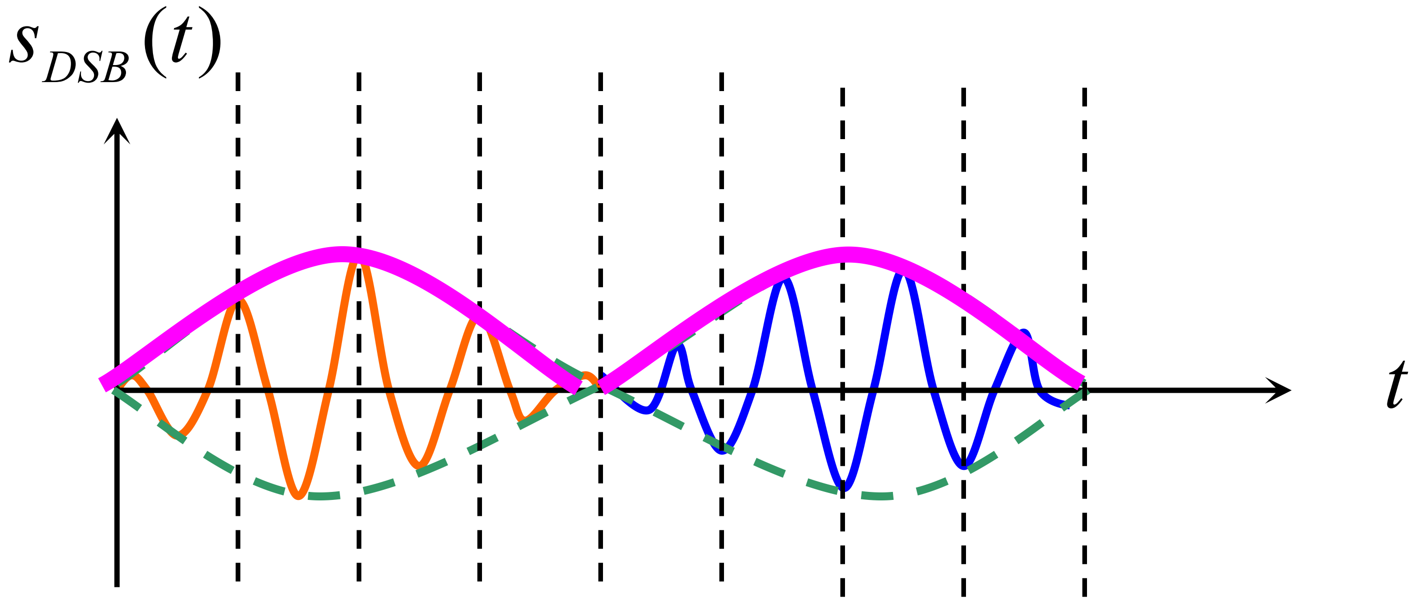
无失真恢复基带信号。



√包络检波（非相干解调）

此法需要大幅度的载波（参阅曹志刚的书）。

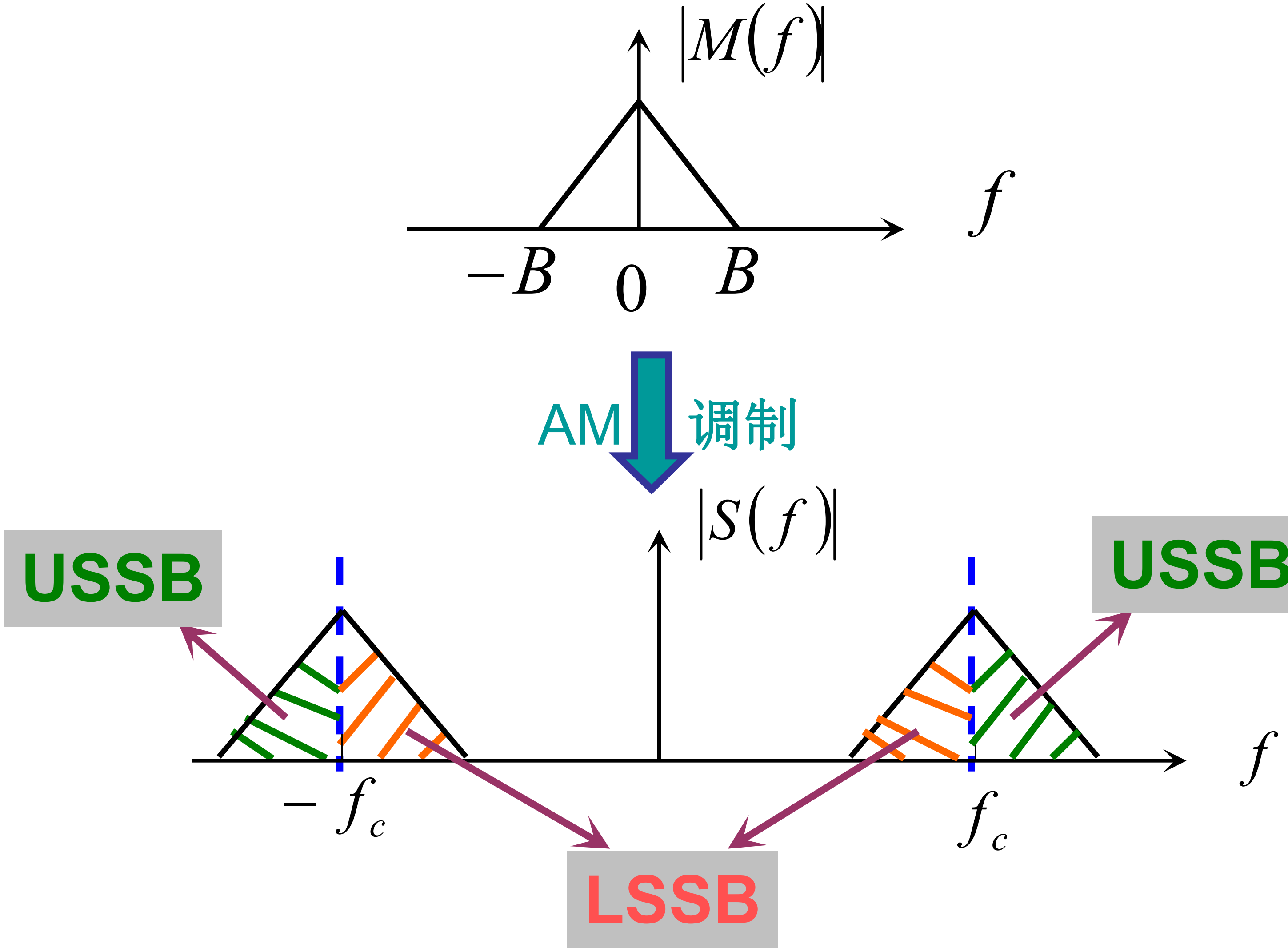
恢复的基带信号有失真。



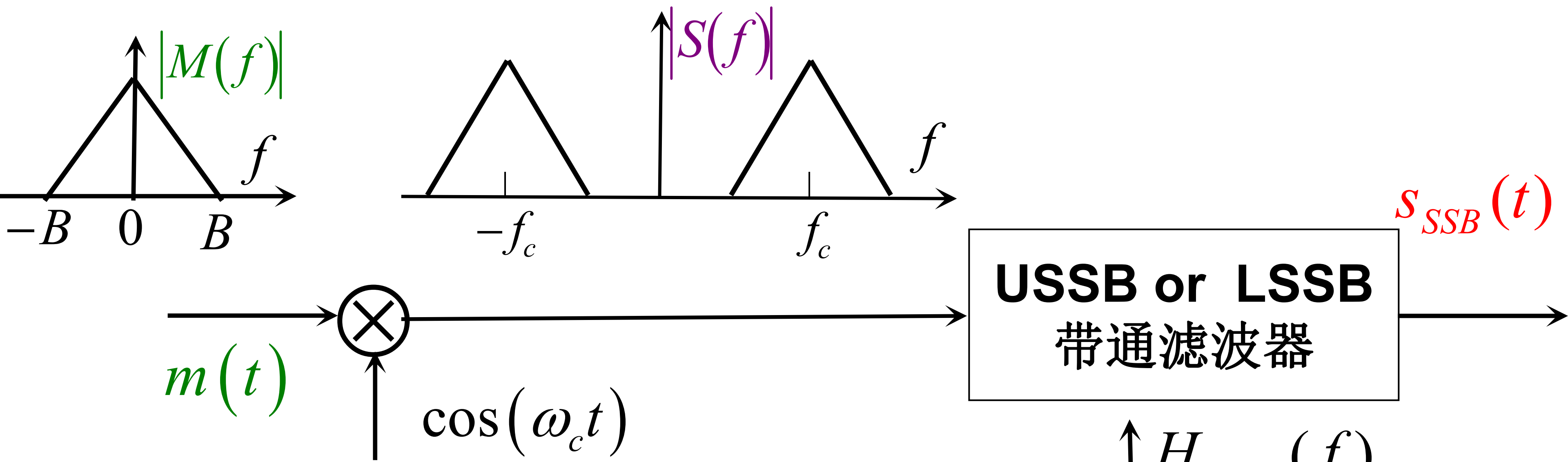
5.1.3 单边带调制

1. 滤波法及SSB信号的频域表示

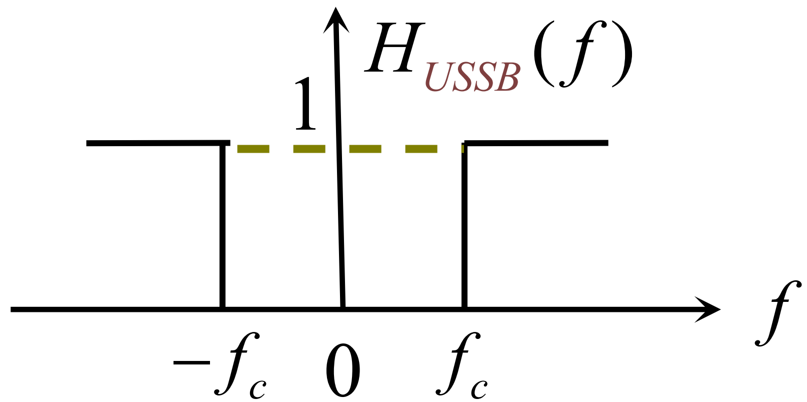
研究SSB－AM信号



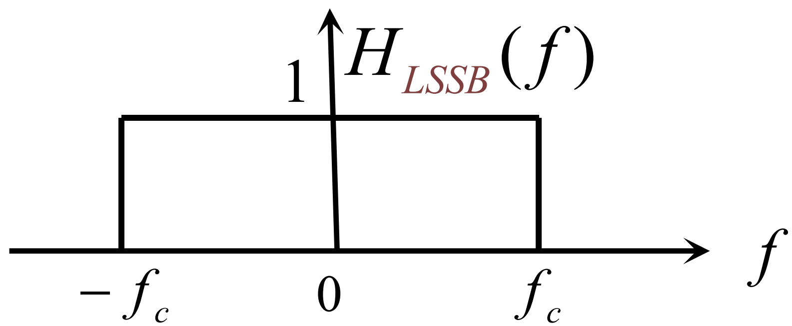
√ 滤波法



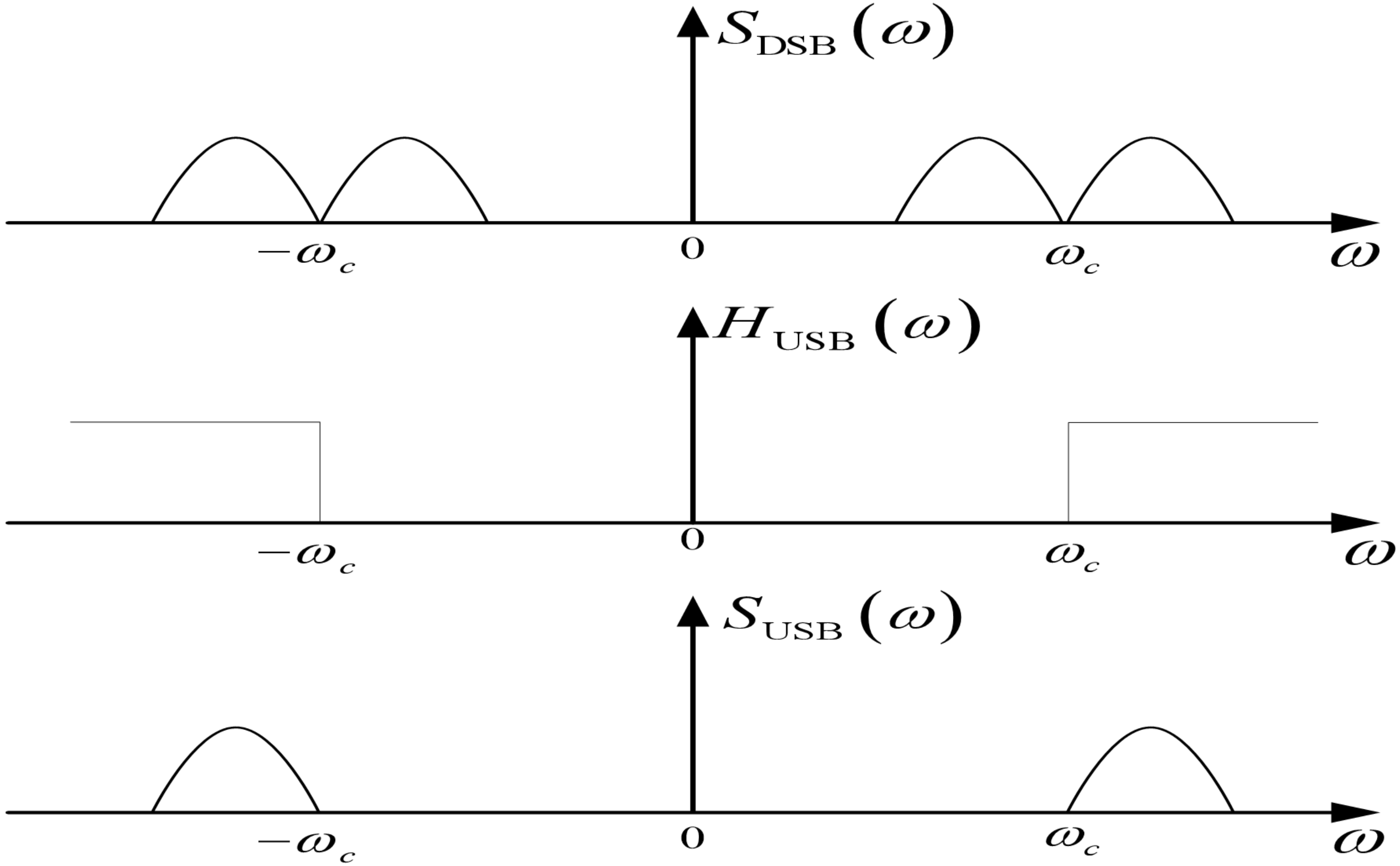
$$H_{USSB}(f)=\begin{cases}1 & |f|>f_c\\ 0 & |f|<f_c\end{cases}$$



$$\text{or}\quad H_{LSSB}(f)=\begin{cases}1 & |f|<f_c\\ 0 & |f|>f_c\end{cases}$$



- 频谱图

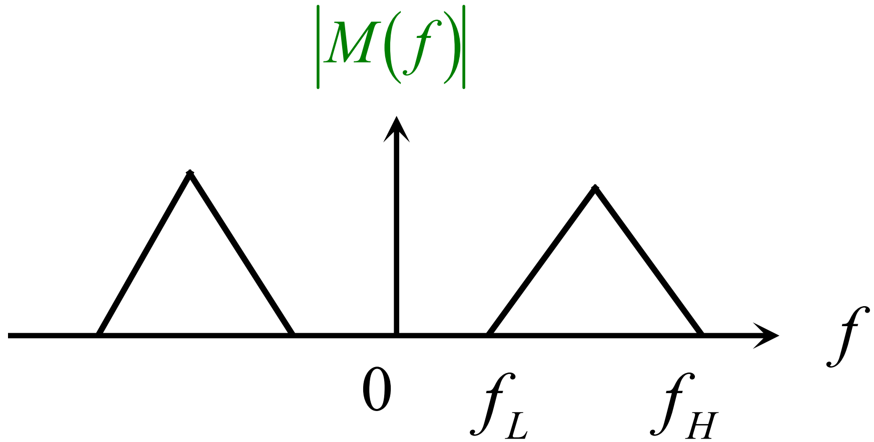


- 技术难点：滤波器实现
- 措施：多级调制（限制调制信号无直流分量）

- 单边带信号的带宽

假设调制信号m(t)的有效频带为f_L～f_H，

则单边带信号的带宽为$B_T = B_m = f_H - f_L$



注意：SSB信号与AM信号和DSB信号不同，前者的**基带**信号采用带通定义，而后者采用低通定义。

$B_{单边带} = B_m = f_H - f_L$，$B_{双边带} = 2B_m = 2f_H$

2. 相移法和SSB信号的时域表示

当调制信号为单频信号时：$m(t) = A_m \cos(\omega_m t)$

有：

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

$$= \underbrace{\frac{1}{2} A_m \cos[(\omega_c + \omega_m)t]}_{\text{上边带}} + \underbrace{\frac{1}{2} A_m \cos[(\omega_c - \omega_m)t]}_{\text{下边带}}$$

于是：

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

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

- **SSB信号的时域表示式**

$$s_{USB}(t)=\frac{1}{2}A_m\cos\left[(\omega_C+\omega_m)t\right]$$

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

$$s_{LSB}(t)=\frac{1}{2}A_m\cos\left[(\omega_C-\omega_m)t\right]$$

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

合并两式：

$$\left.\begin{matrix} s_{USB}(t) \\ s_{LSB}(t) \end{matrix}\right\}=\frac{1}{2}A_m\cos\left(\omega_m t\right)\cos\left(\omega_c t\right)\mp\frac{1}{2}A_m\sin\left(\omega_m t\right)\sin\left(\omega_c t\right)$$

- **SSB信号的时域表示式**

$$m(t) = A_m \cos(\omega_m t)$$

$$\hat{\cos}(\omega_m t) = \sin(\omega_m t)$$

$$\left.\begin{array}{l} s_{USB}(t) \\ s_{LSB}(t) \end{array}\right\} = \frac{1}{2} A_m \cos(\omega_m t) \cos(\omega_c t) \mp \frac{1}{2} A_m \sin(\omega_m t) \sin(\omega_c t)$$

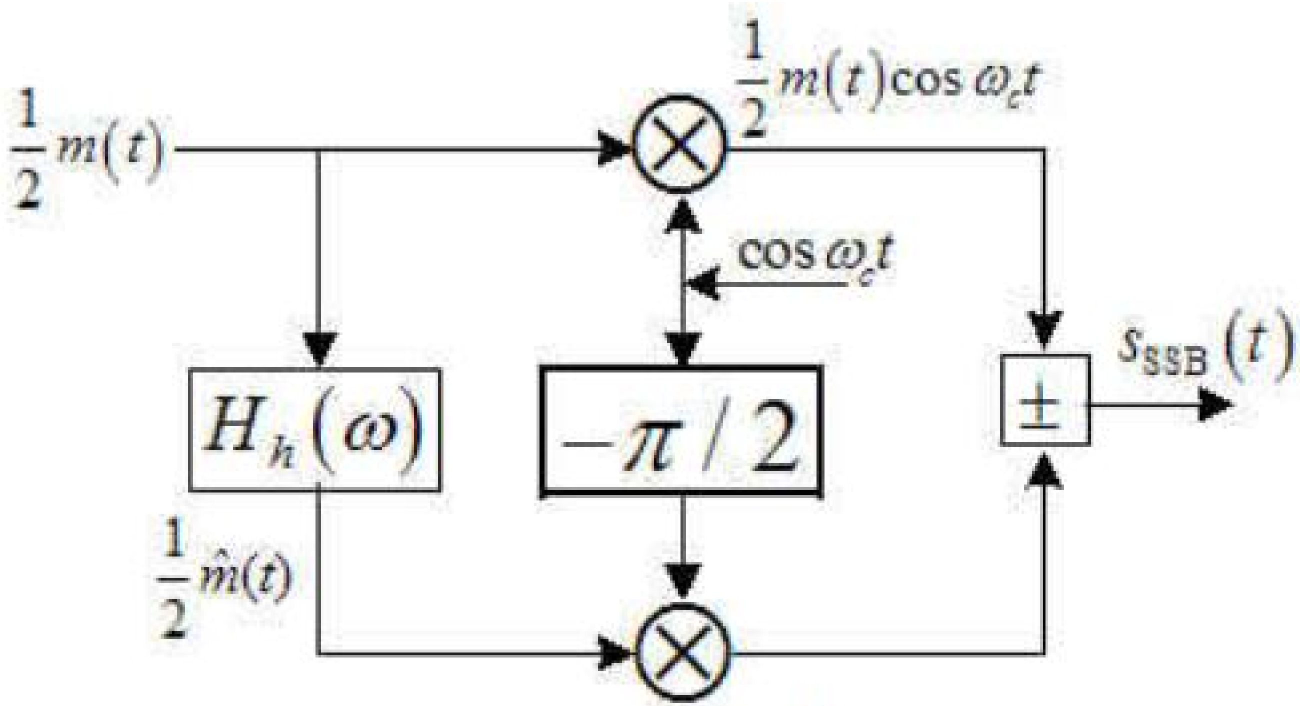
$$\Rightarrow \quad s_{SSB}(t) = \frac{1}{2} m(t) \cos(\omega_c t) \mp \frac{1}{2} \hat{m}(t) \sin(\omega_c t)$$

$$"-" \to \text{USSB}$$

$$"+" \to \text{LSSB}$$

- 相移法的实现

$$s_{SSB}(t)=\frac{1}{2}m(t)\cos\left(\omega_c t\right)\mp\frac{1}{2}\hat{m}(t)\sin\left(\omega_c t\right)$$



$$\frac{1}{2}\hat{m}(t)\sin\left(\omega_c t\right)$$

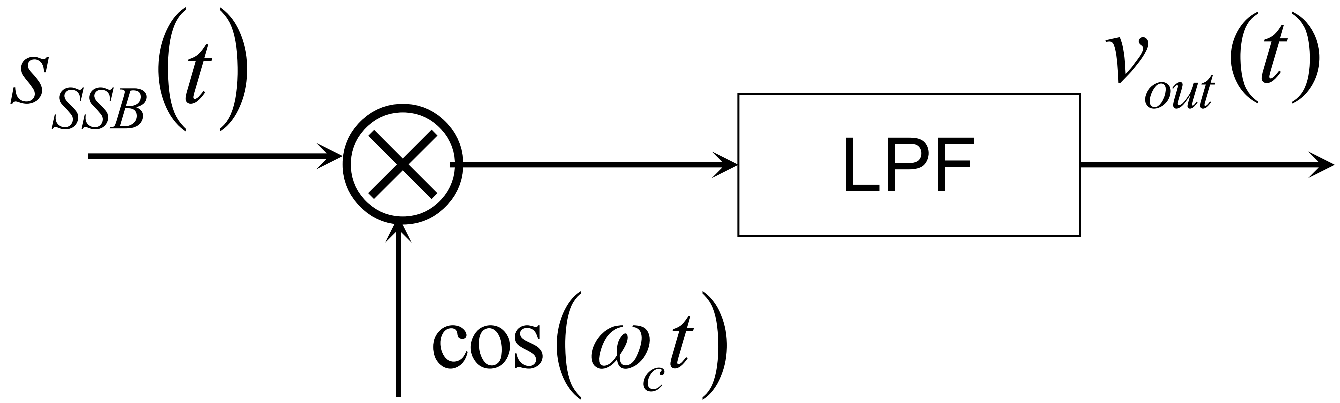
希尔伯特滤波器Hh( )将m(t)的所有频率分量都相移**- π/2**。

3. SSB信号的接收

$$s_{SSB}(t)=\frac{1}{2}[m(t)\cos(\omega_c t)\mp\hat{m}(t)\sin(\omega_c t)]$$

√乘积检波（相干解调）

无失真恢复。

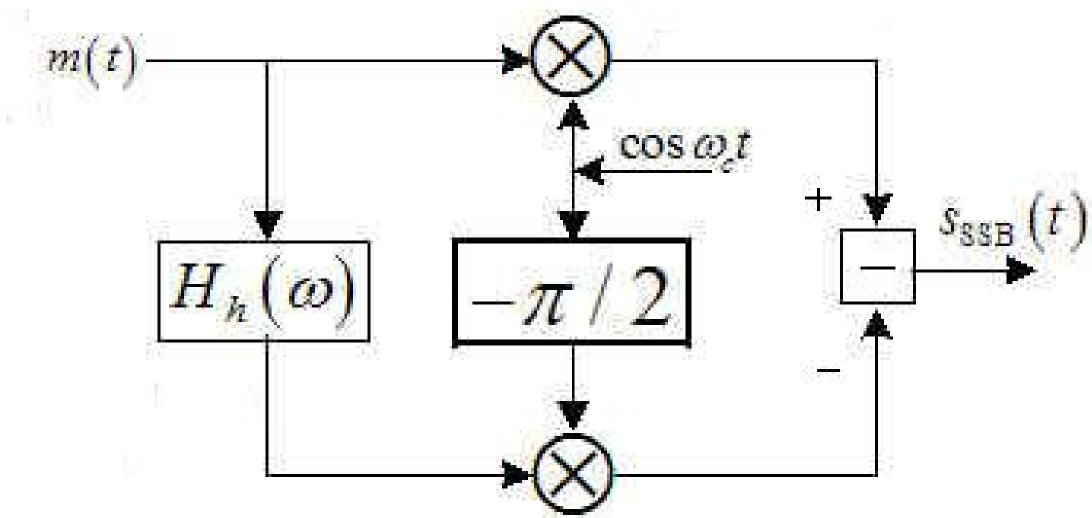


√ 包络检波（非相干解调）

此法需要大幅度的载波。

恢复的基带信号有失真。

例：系统框图如下图所示(注意与标准框图的区别）



若 $m(t)=\cos(200\pi t)+\sin(300\pi t)$，载波 $f_c=1000Hz$

求已调信号表达式、带宽及功率。

解： SSB信号的表达式为

$$s_{SSB}(t) = m(t)\cos\left(2\pi f_c t\right) - \hat{m}(t)\sin\left(2\pi f_c t\right)$$

其中：$\begin{cases} m(t) = \cos\left(200\pi t\right) + \sin\left(300\pi t\right) \\ \hat{m}(t) = \sin\left(200\pi t\right) - \cos\left(300\pi t\right) \end{cases}$

$$B_{\mathrm{m}} = 150 - 100 = 50Hz$$

$$\overline{\mathrm{m}^2(\mathrm{t})} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1W$$

可得：

$$s_{SSB}(t) = \cos\left(2200\pi t\right) + \sin\left(2300\pi t\right)$$

带宽 $B_{SSB} = B_m = 50Hz$

功率 $P_{SSB} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1W$

模拟线性调制

AM	$s_L(t)=A_0+m(t)$	$s(t)=\left[A_0+m(t)\right]\cos\left(\omega_c t\right)$
DSB-SC	$s_L(t)=m(t)$	$s(t)=m(t)\cos\left(\omega_c t\right)$
SSB	$s_L(t)=\frac{1}{2}\left[m(t)\pm j\hat{m}(t)\right]$ + for USSB – for LSSB	$s(t)=\frac{1}{2}\left[m(t)\cos\left(\omega_c t\right)\mp\hat{m}(t)\sin\left(\omega_c t\right)\right]$ – for USSB + for LSSB

	AM	DSB-SC	SSB
带宽B = m(t)的带宽	2B	2B	B
无失真解调	包络检波 乘积检波	乘积检波	乘积检波

模拟线性调制

AM	$s_L(t) = A_0 + m(t)$	$s(t) = \left[A_0 + m(t)\right]\cos\left(\omega_c t\right)$
DSB-SC	$s_L(t) = m(t)$	$s(t) = m(t)\cos\left(\omega_c t\right)$
SSB	$s_L(t) = \frac{1}{2}[m(t) \pm j\hat{m}(t)]$ **+ for USSB** **– for LSSB**	$s(t) = \frac{1}{2}[m(t)\cos\left(\omega_c t\right) \mp \hat{m}(t)\sin\left(\omega_c t\right)]$ **– for USSB** **+ for LSSB**

$$s(t) = \mathrm{Re}\left[s_L(t)e^{j2\pi f_c t}\right]$$

$$s(t) = s_c(t)\cos\left(w_c t\right) - s_s(t)\sin\left(w_c t\right)$$

$$s_L(t) = s_c(t) + js_s(t)$$

根据已调信号频谱内容，幅度调制本身可分为三种类型。

三种幅度调制特点分别如下：

1. 标准幅度调制（AM）

发端：上边带和下边带均被发送，并伴有载波。

收端：对AM信号的解调很简单，如采用包络检波。

应用：广泛应用于商用AM无线广播中，无线广播系统包括一个功率发射机和很多造价低廉的接收机。

2. 抑制载波的双边带（DSB-SC）调制

发端:只发送上边带和下边带。发送同样的消息信号时，需要的功率远小于标准AM的发射功率。

收端:要求相干解调,接收机结构相对复杂。

应用:适用于只有一个发射机和一个接收机的点对点通信。

3. 单边带（SSB）调制

发端:只发送上边带或下边带。需要的信道带宽最小。

收端:要求相干解调,接收机结构相对复杂。

应用:只能应用于能量间隙中心在零频率的消息信号。

常用于二次调制。

第5章 模拟调制系统

核心内容----模拟信号的调制、解调

5.1 幅度调制（线性调制）的原理

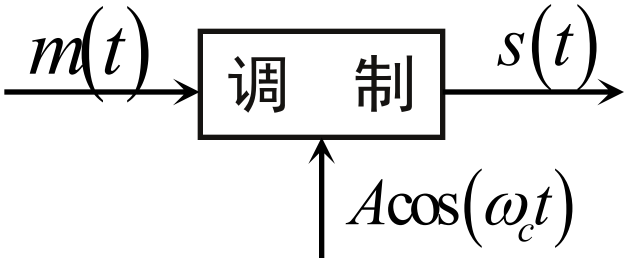
5.2 角度调制（非线性调制）原理

5.3 各种模拟调制系统的比较

5.4 频分复用

5.2 角度调制原理

模拟角调制----用信号去迫使高频载波相位或频率变化。



- 相位调制（**PM**）
- 频率调制（**FM**）

5.2.1 角度调制的基本概念

1. 表达式和相关概念

已调信号为： $s_m(t) = A\cos\left[\omega_c t + \varphi(t)\right]$

(1) 瞬时绝对相位 $\omega_c t + \varphi(t)$

(2) 瞬时相对相位 $\varphi(t)$ 又称相偏

(3) 瞬时绝对频率 $\omega_c + \dfrac{d\varphi(t)}{dt}$

(4) 瞬时相对频率 $\dfrac{d\varphi(t)}{dt}$ 又称频偏

（1）相位调制 (PM)

已调信号为：

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

对 PM ：

$$\varphi(t) = K_P m(t)$$

K_P ⇨ 相位调制器的调相灵敏度

单位： rad/V $\left(\text{m(t) 为电压波形}\right)$

rad/A $\left(\text{m(t) 为电流波形}\right)$

则PM信号为：

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

- 最大相偏

$$\Delta\varphi_{\max} = \left|\varphi(t)\right|_{\max} \overset{PM}{\equiv} K_p \left|m(t)\right|_{\max}$$

- 最大频偏

$$\Delta f_{\max} = \left|f_i(t) - f_c\right|_{\max} \overset{PM}{\equiv} = \frac{1}{2\pi} K_p \left|\frac{d}{dt} m(t)\right|_{\max}$$

- 调相指数

$$m_p = \Delta\varphi_{\max} \Longrightarrow \text{区分NBPM和WBPM}$$

（2）频率调制 (FM)

已调信号为：

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

对 FM ： $$\varphi(t) = 2\pi K_f \int_{-\infty}^{t} m(\tau)\,d\tau$$

K_f ⇨ 频率调制器的调频灵敏度

单位： Hz/V $\big($m(t) 为电压波形$\big)$

Hz/A $\big($m(t) 为电流波形$\big)$

则FM信号为：

$$s_{FM}(t) = A\cos[\omega_c t + 2\pi K_f \int_{-\infty}^{t} m(\tau)\,d\tau]$$

- 最大频偏

$$\Delta f_{\max} = \left| f_i(t) - f_c \right|_{\max} \overset{FM}{=\!=} K_f \left| m(t) \right|_{\max}$$

- 最大相偏

$$\Delta \varphi_{\max} = \left| \varphi(t) \right|_{\max} \overset{FM}{=\!=} 2\pi K_f \left| \int_{-\infty}^{t} m(\tau)\,d\tau \right|_{\max}$$

- 调频指数

$$m_f = \frac{\Delta f_{\max}}{B} = \frac{\Delta f_{\max}}{f_m} \Longrightarrow \text{区分NBFM和WBFM}$$

$B \rightarrow m(t)$的带宽

角调制信号(PM 和 FM)的表达式：

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

$$PM: \varphi(t) = K_p m(t)$$

$$FM: \varphi(t) = 2\pi K_f \int_{-\infty}^{t} m(\tau)\, d\tau$$

小 结

PM 信号

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

- 最大相偏

$$\Delta\varphi_{\max} = \left|\varphi(t)\right|_{\max}$$

- 最大频偏

$$\Delta f_{\max} = \left|f_i(t) - f_c\right|_{\max}$$

- 调相指数

$$m_p = \Delta\varphi_{\max}$$

FM 信号

$$s_{FM}(t) = A\cos[\omega_c t + 2\pi K_f \int_{-\infty}^{t} m(\tau)d\tau]$$

- 最大相偏

$$\Delta\varphi_{\max} = \left|\varphi(t)\right|_{\max}$$

- 最大频偏

$$\Delta f_{\max} = \left|f_i(t) - f_c\right|_{\max}$$

- 调频指数

$$m_f = \frac{\Delta f_{\max}}{B} = \frac{\Delta f_{\max}}{f_m}$$

例 若消息信号为： $m(t)=a\cos(2\pi f_m t)$

对载波 $A\cos(2\pi f_c t)$ 既可以进行调频，又可调相。

确定调频和调相信号的表达式。假设 K_f 和 K_p 为已知。

解： **PM**信号对应的相位偏移：

$$\varphi(t)=K_p m(t)=K_p a\cos(2\pi f_m t)$$

FM信号对应的相位偏移：

$$\varphi(t)=2\pi K_f\int m(\sigma)d\sigma \quad =\frac{K_f a}{f_m}\sin(2\pi f_m t)$$

调相信号： $$s_{PM}(t)=A\cos\left[2\pi f_c t+K_p a\cos(2\pi f_m t)\right]$$

调频信号： $$s_{FM}(t)=A\cos\left[2\pi f_c t+\frac{K_f a}{f_m}\sin(2\pi f_m t)\right]$$

例　　已知调角波：

$$s(t)=2\cos\left(10^7\pi t+4\cos 10^3\pi t+\cos 10^4\pi t\right)$$

（1）求 $\Delta f_{\max}$ 与 $\Delta\varphi_{\max}$；

（2）若 $s(t)$ 是调相波，　$K_p=2$，求 $m(t)$ 与 m_p；

（3）若 $s(t)$ 是调频波，　$K_f=2000$，求 $m(t)$ 与 m_f　。

解：（1）此调角波信号的相位偏移：

$$\varphi(t)=4\cos\left(10^3\pi t\right)+\cos\left(10^4\pi t\right)$$

最大相偏：　$$\Delta\varphi_{\max}=\left|4\cos\left(10^3\pi t\right)+\cos\left(10^4\pi t\right)\right|_{\max}=4+1=5$$

此调角波信号的频率偏移：

$$f_i(t)-f_C=\frac{1}{2\pi}\frac{d\varphi(t)}{dt}=-2\times10^3\sin\left(10^3\pi t\right)-0.5\times10^4\sin\left(10^4\pi t\right)$$

最大频偏：　$$\Delta f_{\max}=\left|2\times10^3\sin\left(10^3\pi t\right)+5\times10^3\sin\left(10^4\pi t\right)\right|_{\max}\approx6975$$

例　已知调角波：

$$s(t)=2\cos\left(10^7\pi t+4\cos 10^3\pi t+\cos 10^4\pi t\right)$$

（1）求 $\Delta f_{\max}$ 与 $\Delta\varphi_{\max}$；

（2）若 $s(t)$ 是调相波，$K_p=2$，求 $m(t)$ 与 m_p；

（3）若 $s(t)$ 是调频波，$K_f=2000$，求 $m(t)$ 与 m_f。

（2）　若为PM波，其相位偏移：

$$\varphi(t)=K_P m(t)=4\cos\left(10^3\pi t\right)+\cos\left(10^4\pi t\right)$$

调制信号：$m(t)=\dfrac{4\cos\left(10^3\pi t\right)+\cos\left(10^4\pi t\right)}{K_P}$

$$=2\cos\left(10^3\pi t\right)+0.5\cos\left(10^4\pi t\right)$$

调相指数：$m_P=\Delta\varphi_{\max}=5$

例　已知调角波：

$$s(t)=2\cos\left(10^{7}\pi t+4\cos 10^{3}\pi t+\cos 10^{4}\pi t\right)$$

（1）求 $\Delta f_{\max}$ 与 $\Delta\varphi_{\max}$；

（2）若 $s(t)$ 是调相波，$K_p=2$，求 $m(t)$ 与 m_p；

（3）若 $s(t)$ 是调频波，$K_f=2000$，求 $m(t)$ 与 m_f。

（3）若为FM波，其频率偏移：

$$\Delta f=K_f m(t)=-2\times10^{3}\sin\left(10^{3}\pi t\right)-5\times10^{3}\sin\left(10^{4}\pi t\right)$$

调制信号：$$m(t)=\frac{-2\times10^{3}\sin\left(10^{3}\pi t\right)-0.5\times10^{4}\sin\left(10^{4}\pi t\right)}{2000}$$

$$=-\sin\left(10^{3}\pi t\right)-2.5\sin\left(10^{4}\pi t\right)$$

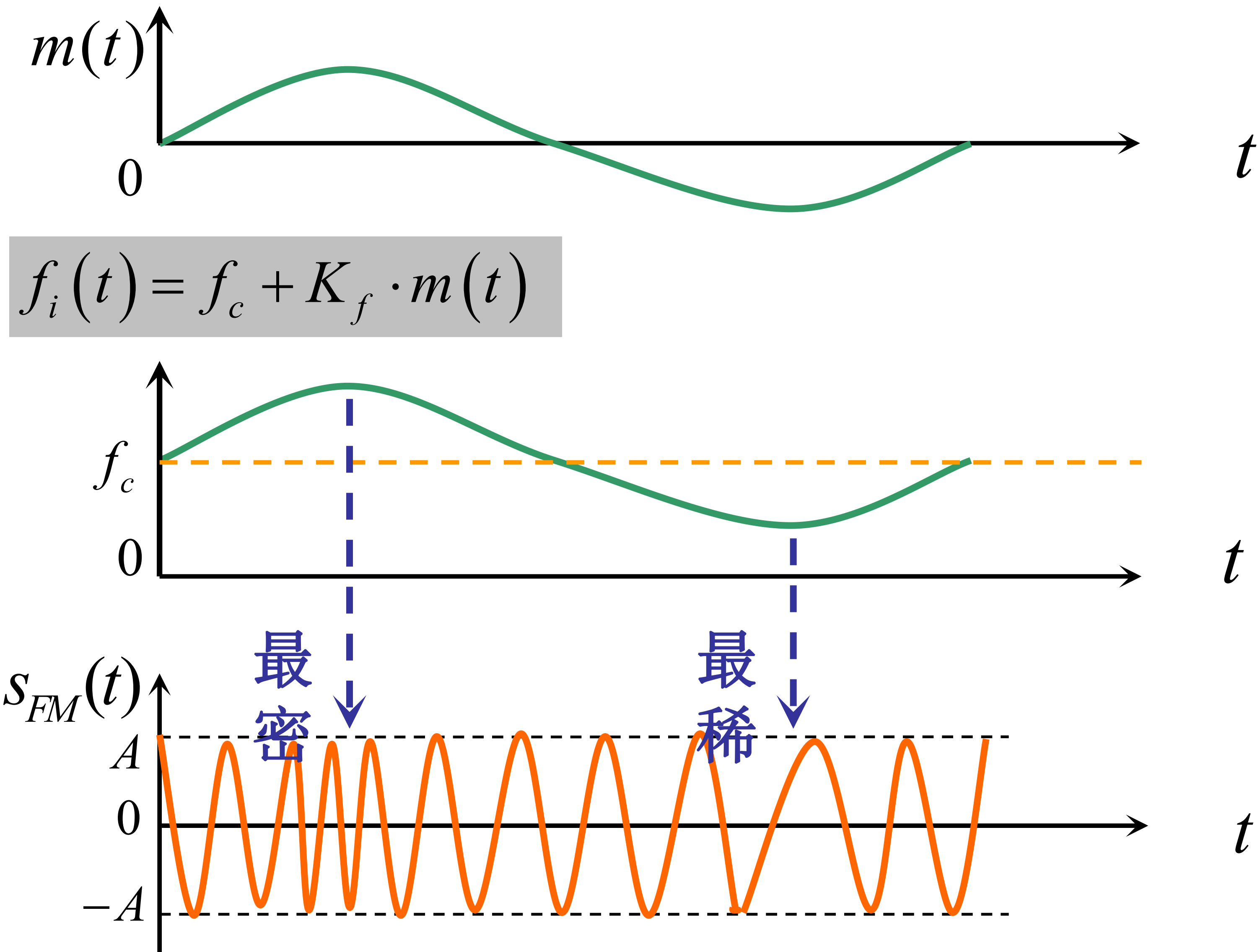
调频指数：$$m_f=\frac{\Delta f_{\max}}{B}=\frac{6.975\times10^{3}}{5\times10^{3}}\approx1.4$$

2. 波形

（1）FM

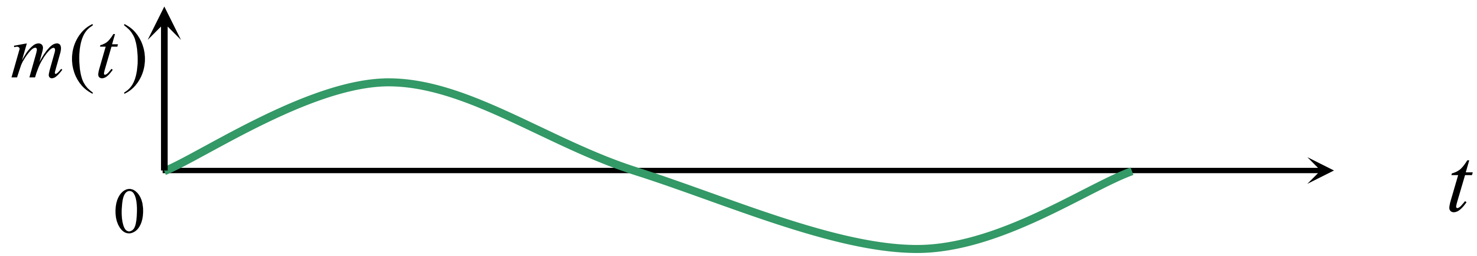
$$s_{FM}(t) = A\cos[\omega_c t + 2\pi K_f \int_{-\infty}^{t} m(\tau)d\tau]$$

$$f_i(t) = f_c + K_f \cdot m(t)$$

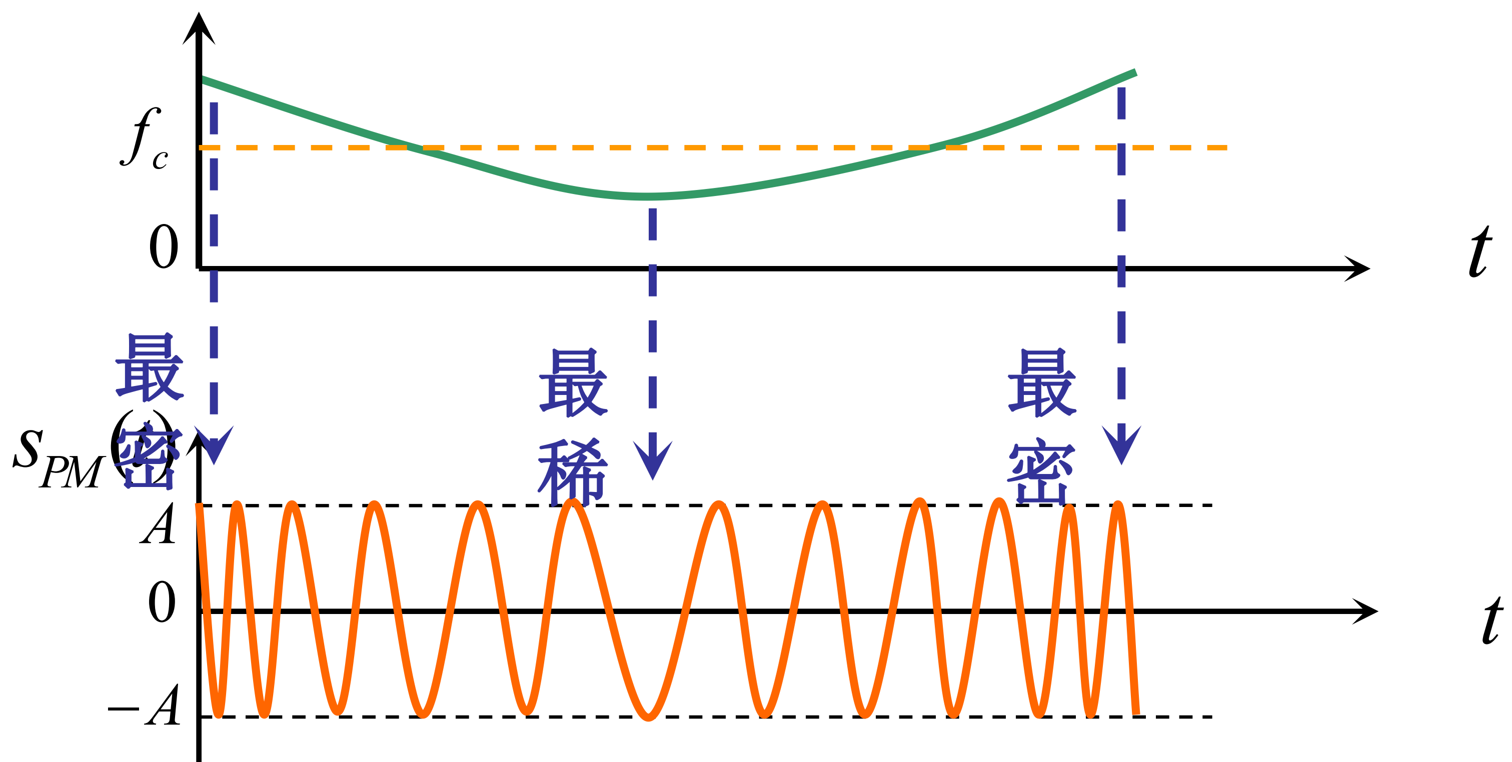


(2) **PM**

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

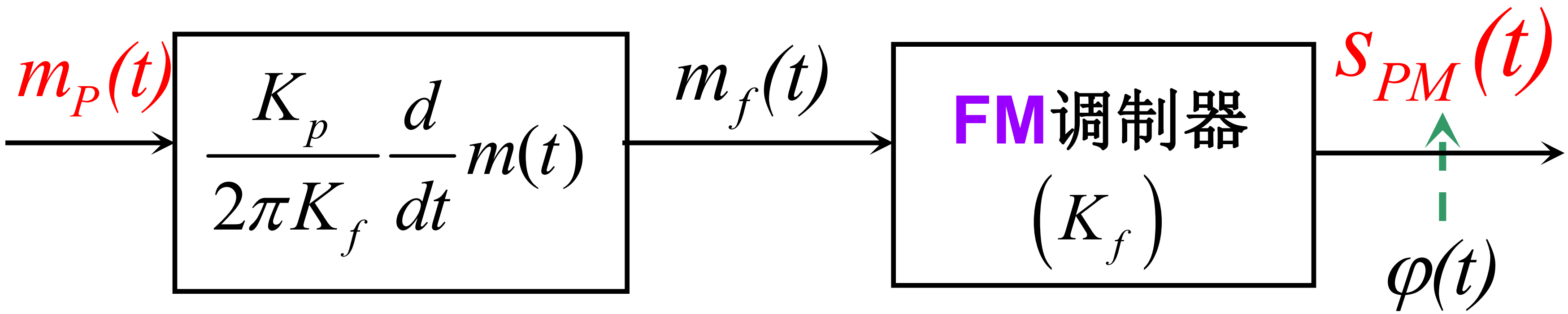


$$f_i(t) = f_c + \frac{K_p}{2\pi}\cdot\frac{dm(t)}{dt}$$



3. 两者的等效关系

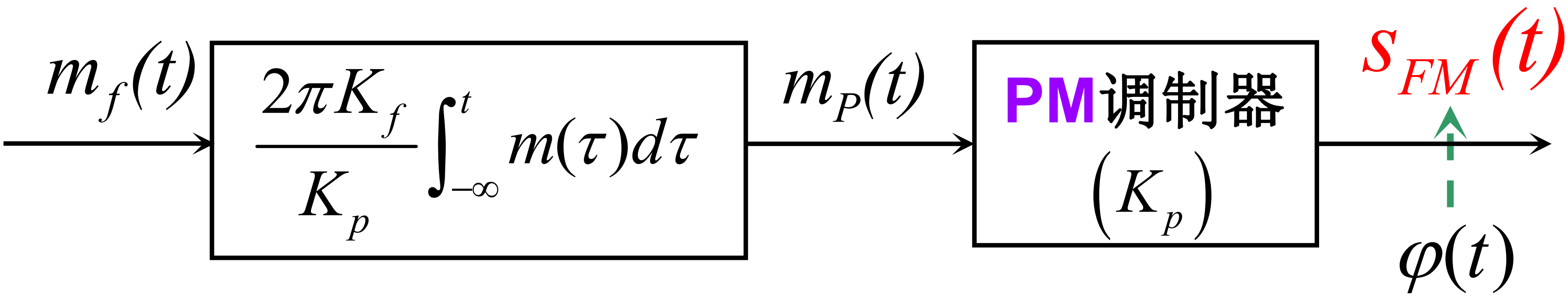
（1）用FM调制器产生PM信号



$$m_f(t)=\frac{K_p}{2\pi K_f}\cdot\frac{dm_P(t)}{dt}$$

$$\varphi(t)=2\pi K_f\int_{-\infty}^{t}m_f(\tau)d\tau \quad =K_p\cdot m_P(t)$$ ⇨ PM 信号

（2）用PM调制器产生FM信号



$$m_P(t) = \frac{2\pi K_f}{K_p} \cdot \int_{-\infty}^{t} m_f(\tau)d\tau$$

$$\varphi(t) = K_p m_p(t) \quad = 2\pi K_f \cdot \int_{-\infty}^{t} m_f(\tau)d\tau$$ ⇨ **FM 信号**

5.2.2 窄带调频（NBFM）

若FM信号的最大相偏满足以下条件：

$$2\pi\left|K_f\int_{-\infty}^{t}m(\tau)d\tau\right| << \frac{1}{12}$$

称FM信号为窄带调频。 反之为宽带调频。

则对应的窄带调频信号的时域表达式为：

$$s_{NBFM}(t)=A\cos[\omega_c t+2\pi K_f\int_{-\infty}^{t}m(\tau)d\tau]$$

$$=A\cos(\omega_c t)\cos\left[2\pi K_f\int_{-\infty}^{t}m(\tau)d\tau\right]-A\sin(\omega_c t)\sin\left[2\pi K_f\int_{-\infty}^{t}m(\tau)d\tau\right]$$

$$\approx A\cos(\omega_c t)-2\pi AK_f[\int_{-\infty}^{t}m(\tau)d\tau]\sin(\omega_c t)$$

自 学

$$s_{NBFM}(t) \approx A\cos(\omega_c t) - 2\pi A K_f \left[\int_{-\infty}^{t} m(\tau)d\tau\right]\sin(\omega_c t)$$

傅氏变换

$$\approx A\cos(\omega_c t) - A\varphi(t)\sin(\omega_c t)$$

则窄带调频信号的频域表达式为:

$$s_{\mathrm{NBFM}}(\omega) = \pi A[\delta(\omega+\omega_c) + \delta(\omega-\omega_c)]$$

$$+\frac{AK_f}{2}\left[\frac{M(\omega-\omega_c)}{\omega-\omega_c} - \frac{M(\omega+\omega_c)}{\omega+\omega_c}\right]$$

自 学

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

$$S_{NBFM}(\omega)=\pi A[\delta(\omega+\omega_c)+\delta(\omega-\omega_c)]+\frac{AK_f}{2}\left[\frac{M(\omega-\omega_c)}{\omega-\omega_c}-\frac{M(\omega+\omega_c)}{\omega+\omega_c}\right]$$

- **NBFM和AM信号频谱的比较**

- 带宽相同
- 边频分别乘了因式[1/(ω - ω_c)]和[1/(ω + ω_c)]
- NBFM的一个边带和AM反相

自 学

- 单音调制NBFM和AM信号频谱的比较

调制信号 $m(t) = A_m \cos(\omega_m t)$

AM信号

$$S_{AM}(\omega) = \pi A_m[\delta(\omega+\omega_c)+\delta(\omega-\omega_c)]$$

$$+\frac{\pi A_m}{2}[\delta(\omega+\omega_c+\omega_m)+\delta(\omega+\omega_c-\omega_m)+\delta(\omega-\omega_c+\omega_m)+\delta(\omega-\omega_c-\omega_m)]$$

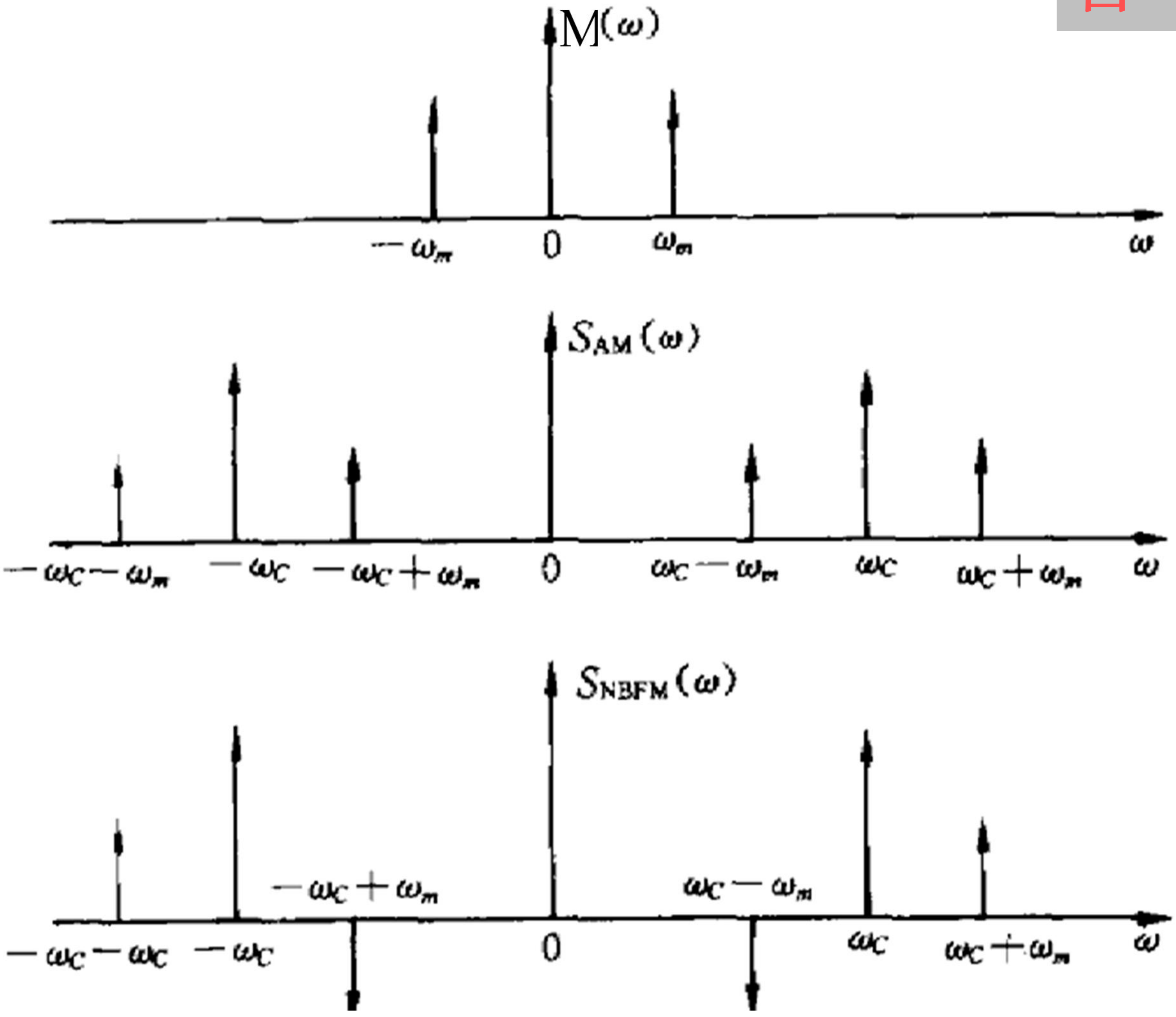
NBFM信号

$$S_{NBFM}(\omega) = \pi A_m[\delta(\omega+\omega_c)+\delta(\omega-\omega_c)]$$

$$+\frac{\pi A_m K_f}{2}\left[\frac{\delta(\omega-\omega_c+\omega_m)+\delta(\omega-\omega_c-\omega_m)}{\omega-\omega_c}-\frac{\delta(\omega+\omega_c+\omega_m)+\delta(\omega+\omega_c-\omega_m)}{\omega+\omega_c}\right]$$

自 学

- 频谱图



$M(\omega)$
$-\omega_m$
0
ω_m
ω
$S_{AM}(\omega)$
$-\omega_C-\omega_m$
$-\omega_C$
$-\omega_C+\omega_m$
0
$\omega_C-\omega_m$
ω_C
$\omega_C+\omega_m$
ω
$S_{NBFM}(\omega)$
$-\omega_C+\omega_m$
$\omega_C-\omega_m$
$-\omega_C-\omega_C$
$-\omega_C$
0
ω_C
$\omega_C+\omega_m$
ω

5.2.3 宽带调频（WBFM）

1. 调频信号表达式

分析 ： 正弦调制的FM的谱

令调制信号为： $m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t)$

则相偏

$$\varphi(t) = 2\pi K_f \int_{-\infty}^{t} m_f(\sigma) d\sigma = 2\pi K_f \int_{-\infty}^{t} A_m \cos(\omega_m \sigma) d\sigma$$

$$= \frac{2\pi K_f \cdot A_m}{\omega_m} \sin(\omega_m t) = \frac{K_f \cdot A_m}{f_m} \sin(\omega_m t)$$

$$\Delta f_{\max} = K_f \left| m(t) \right|_{\max} = K_f \cdot A_m$$

$$\because m_f = \frac{\Delta f_{\max}}{f_m} = \frac{K_f \cdot A_m}{f_m}$$

$$\therefore \varphi(t) = m_f \sin(\omega_m t)$$

则**FM**信号为：

$$s_{FM}(t) = A\cos[\omega_c t + m_f \sin(\omega_m t)]$$

$$= A\cos(\omega_c t)\cos(m_f \sin(\omega_m t)) - A\sin(\omega_c t)\sin(m_f \sin(\omega_m t))$$

$$= A\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m_f)\cos[(\omega_c + \mathrm{n}\omega_m)t]$$

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

则**FM**信号的频谱为：

$$S_{FM}(\omega) = \pi A \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m_f)\left[\delta(\omega-\omega_c - n\omega_m) + \delta(\omega+\omega_c + n\omega_m)\right]$$

式中：

$$J_n\left(m_f\right) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} e^{j\left(m_f \sin\theta - n\theta\right)} d\theta$$

$$-\infty < n < \infty, m_f \geq 0$$

为第一类n阶贝塞尔（**Bessel**）函数

$$J_n(m_f)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}e^{j(m_f\sin\theta-n\theta)}d\theta$$

√性质：

(1) $J_{-n}(m_f)=(-1)^n J_n(m_f)$

n为奇数时，$J_{-n}(m_f)=-J_n(m_f)$

n为偶数时，$J_{-n}(m_f)=J_n(m_f)$

(2) $J_n(0)=\dfrac{\sin(n\pi)}{n\pi}$

(3)对任意m_f值，各阶贝塞尔函数的平方和恒等于1

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty}J_n^2(m_f)=1$$

n \ m_f	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.9385	0.7652	0.2239	−0.2601	−0.3971	−0.1776	0.1506	0.3001	0.1717	−0.0903
1	**0.2423**	0.4401	0.5767	0.3391	−0.0660	−0.3276	−0.2767	−0.0047	0.2346	0.2453
2	0.0306	**0.1149**	0.3528	0.4861	0.3641	0.0466	−0.2429	−0.3014	−0.1130	0.1448
3	0.0026	0.0196	**0.1289**	0.3091	0.4302	0.3648	0.1148	−0.1676	−0.2911	−0.1809
4		0.0025	0.0340	**0.1320**	0.2811	0.3912	0.3576	0.1578	−0.1054	−0.2655
5			0.0070	0.0430	**0.1321**	0.2611	0.3621	0.3479	0.1858	−0.0550
6			0.0012	0.0114	0.0491	**0.1310**	0.2458	0.3392	0.3376	0.2043
7				0.0026	0.0152	0.0534	**0.1296**	0.2336	0.3206	0.3275
8					0.0040	0.0184	0.0565	**0.1280**	0.2235	0.3051
9						0.0055	0.0212	0.0589	**0.1263**	0.2149
10						0.0015	0.0070	0.0235	0.0608	**0.1247**
11							0.0021	0.0083	0.0256	0.0622
12								0.0027	0.0096	0.0274
13									0.0033	0.0108
14									0.0010	0.0039
15										0.0013

序号	m_f
1	2.40
2	5.52
3	8.65
4	11.79
5	14.93
6	18.07
7	21.21
8	24.35

$J_0(m_f)=0$的m_f值

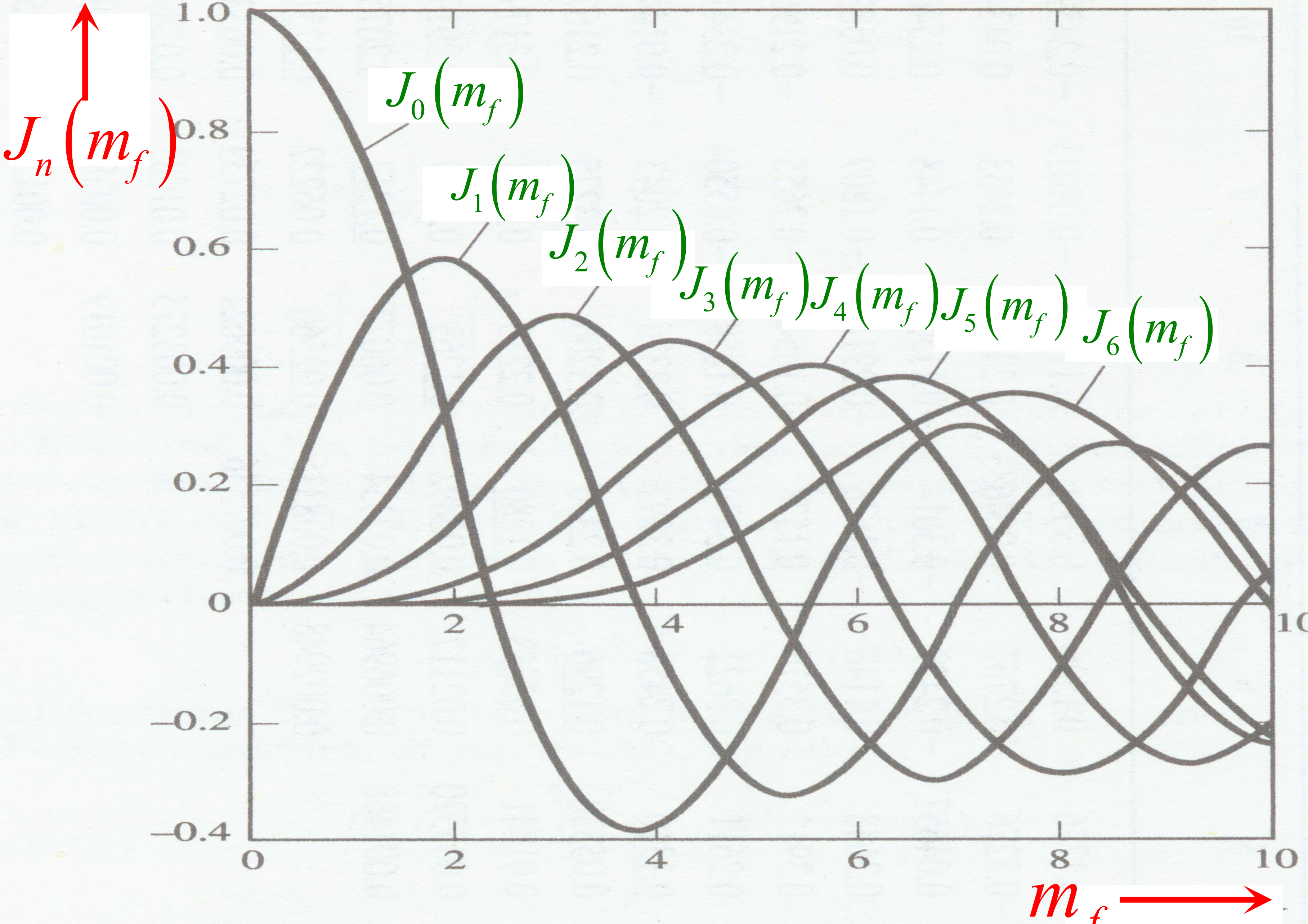
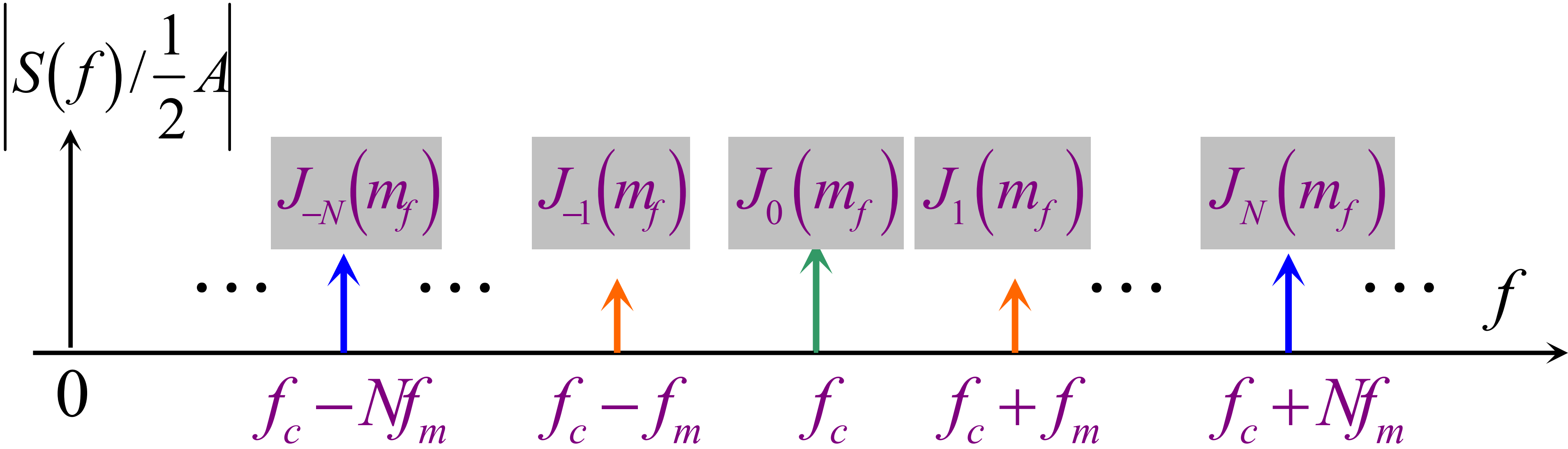


Figure 5–10 Bessel functions for $n = 0$ to $n = 6$.

$$S_{FM}(f)=\frac{A}{2}\sum_{n=-\infty}^{\infty}J_n(m_f)\left[\delta(f-f_c-nf_m)+\delta(f+f_c+nf_m)\right]$$

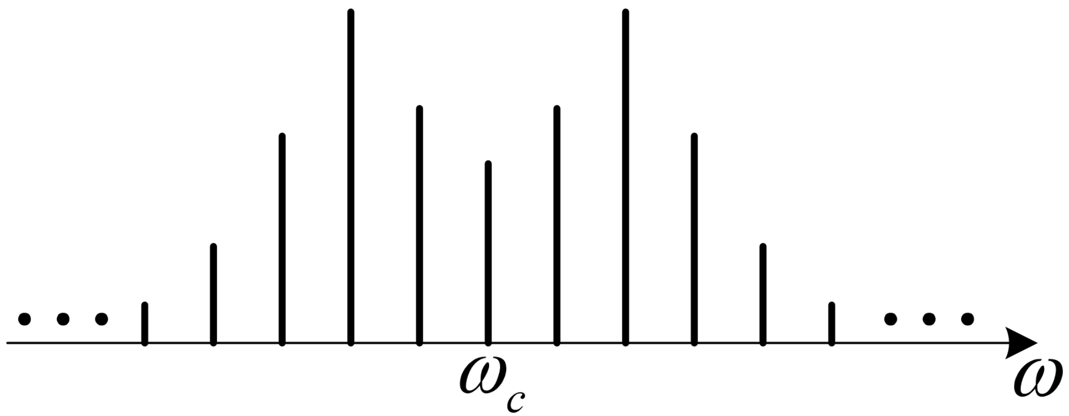


$n=0\rightarrow f_c$ 分量，幅度为 $\frac{A}{2}J_0\left(m_f\right)$

$n\neq 0\rightarrow$ 边频分量，幅度为 $\frac{A}{2}J_n\left(m_f\right)$

2. 调频信号的带宽

典型频谱结构



带宽

- 绝对带宽无限大
- 工程计算（卡森公式）

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

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

当$m_f \ll 1$时，$B_{FM}\approx 2f_m$，窄带调频的带宽。

当$m_f \gg 1$时，$B_{FM}\approx 2\Delta f_{\max}$，宽带调频的带宽。

当任意限带信号调制时，f_m是调制信号的最高频率，

m_f是最大频偏 Δf 与 f_m之比。

例 FM广播中规定的最大频偏Δf为75kHz，最高调制频率f_m为15kHz

故调频指数 $m_f=5$ 信号的频带宽度为 180kHz

3. 调频信号的功率分配

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

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty}J_n^2(m_f)=1$$

$$P_{FM}=\overline{s_{FM}^{\,2}(t)}$$

$$=\overline{A\left[\cdots+J_{-1}(m_f)\cos[(\omega_c-\omega_m)t]+J_0(m_f)\cos(\omega_c t)+J_1(m_f)\cos[(\omega_c+\omega_m)t]+\cdots\right]}$$

$$\overline{\times A\left[\cdots+J_{-1}(m_f)\cos[(\omega_c-\omega_m)t]+J_0(m_f)\cos(\omega_c t)+J_1(m_f)\cos[(\omega_c+\omega_m)t]+\cdots\right]}$$

$$=\frac{A^2}{2}\left[\cdots+J_{-1}^{\,2}(m_f)+J_0^{\,2}(m_f)+J_1^{\,2}(m_f)+\cdots\right]$$

$$=\frac{A^2}{2}\sum_{n=-\infty}^{\infty}J_n^{\,2}(m_f)\quad=\frac{1}{2}A^2$$

3. 调频信号的功率分配

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

$$P_{FM}=\overline{s_{FM}^{\ 2}(t)}$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty}J_n^2(m_f)=1$$

$$=\frac{A^2}{2}\sum_{n=-\infty}^{\infty}J_n^{\ 2}(m_f)\quad=\frac{1}{2}A^2$$

$$J_n(0)=\frac{\sin(n\pi)}{n\pi}$$

n=0对应载波，

其功率为 $P_C=\frac{1}{2}A^2J_0^2(m_f)$

n≠0对应边频，

其功率为 $P_{边}=\frac{1}{2}A^2J_n^2(m_f)$

▲ 当$m_f=0$, $P_C=\frac{1}{2}A^2J_0^2(0)=\frac{1}{2}A^2$ 边频功率为0；

▲ 当$m_f\neq 0$, 载波功率下降，转变为各边频功率，总功率不变。

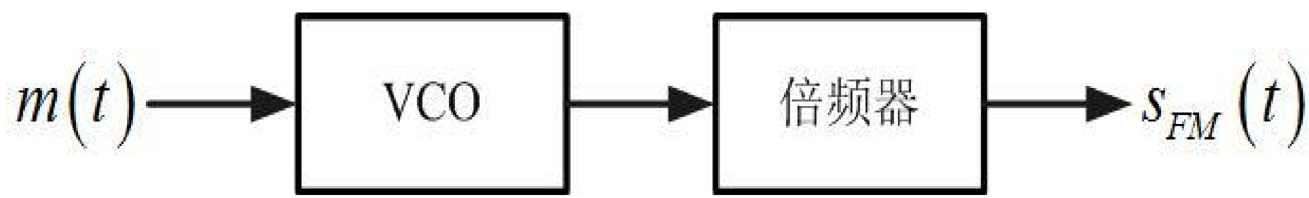
m_f 不同时，载波功率与各边频功率的分配关系也发生变化。

5.2.4 调频信号的产生与解调

1. 调频信号的产生

1） 直接调频法

用调制信号直接改变载波振荡器频率的方法。



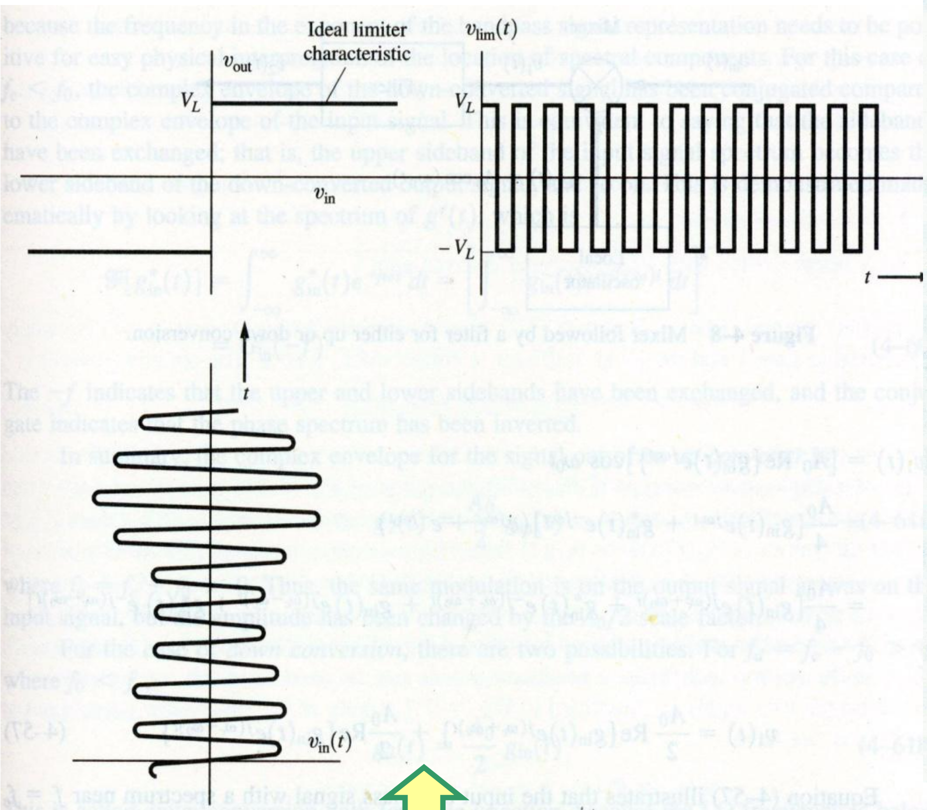
优点： 可得到很大的频偏

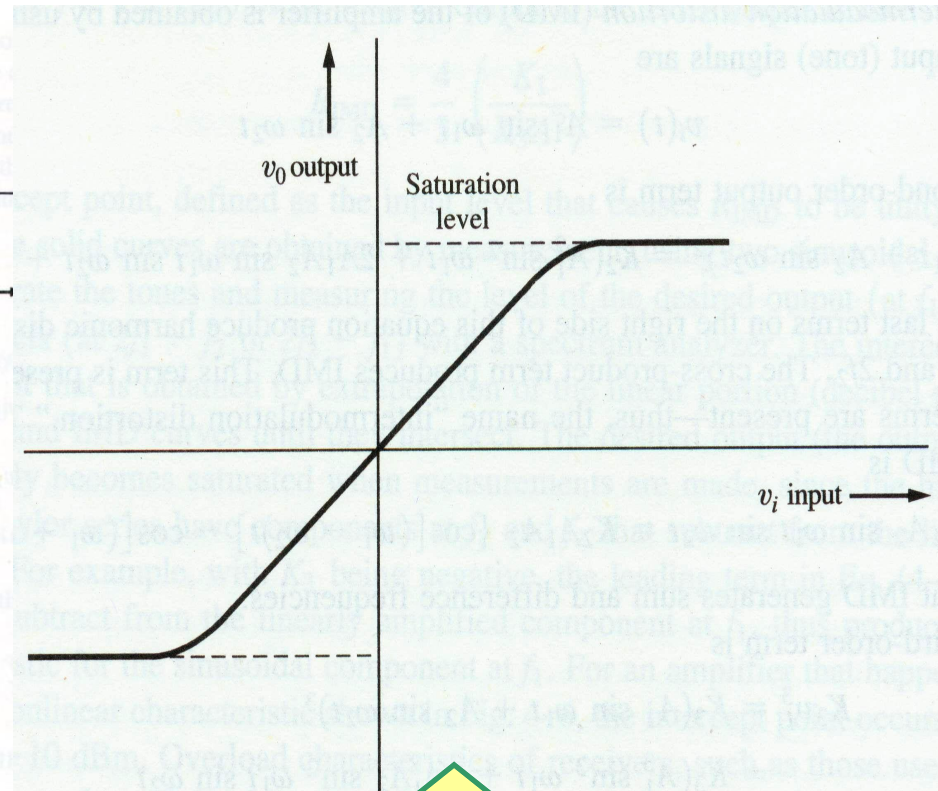
缺点： 载频会发生漂移，需附加稳频电路

限 幅 器

补充

限幅器：具有饱和输出特性的非线性电路





硬（理想）限幅器特性

软饱和限幅器特性

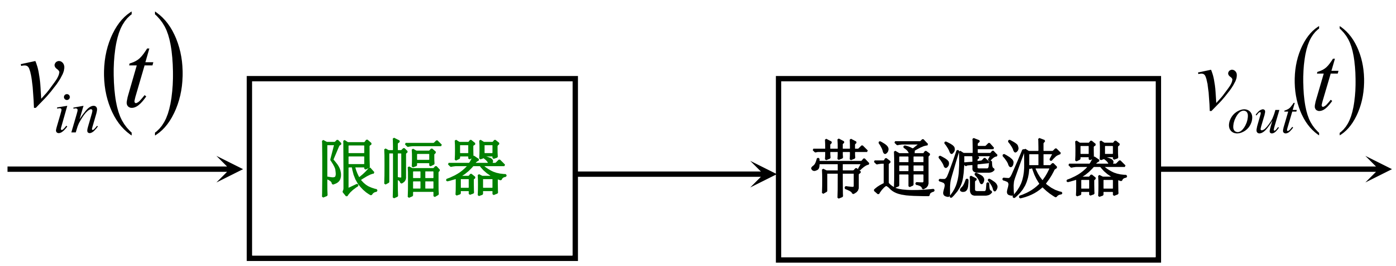
补充

功能：

消除输入信号实包络上的变化

应用：

为角度调制设计的接收系统中，如PSK, FSK 和模拟 FM



带通输入：

$$v_{in}(t) = a(t) \cdot \cos[\omega_c t + \varphi(t)]$$

理想带通限幅器输出：

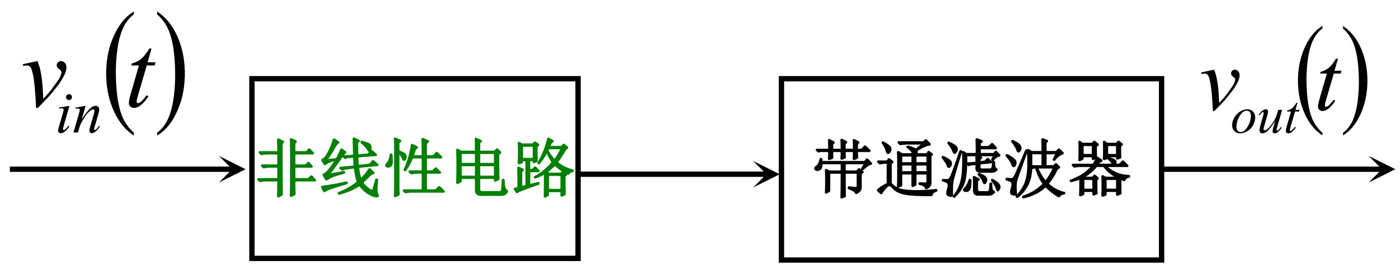
$$v_{out}(t) = K \cdot V_L \cdot \cos[\omega_c t + \varphi(t)]$$

倍 频 器

补充

倍频器：输出信号将位于输入载波的n次谐波所在的频段上

应用：角度调制系统中，如PM 和FM



带通输入：$v_{in}(t)=a(t)\cdot\cos[\omega_c t+\varphi(t)]$

倍频器输出：$v_{out}(t)=C\cdot R^n(t)\cdot\cos[n\omega_c t+n\varphi(t)]$

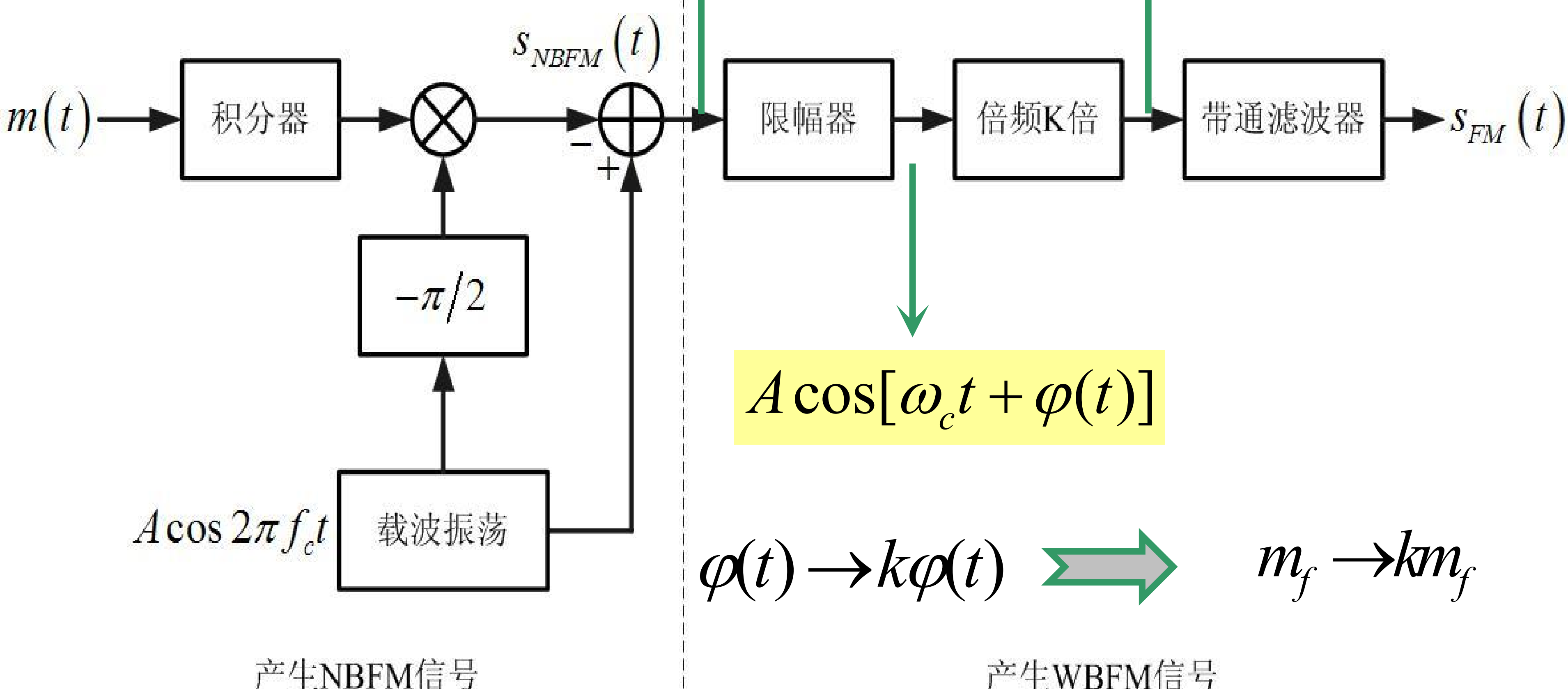
n=2 ➔ 双级倍频器　　n=3 ➔ 三级倍频器

2） 间接调频法（阿姆斯特朗法）

有偶发**AM**项

$$A\sqrt{1+\varphi^2(t)}$$

$$c\cdot A^k\cos[k\omega_c t+k\varphi(t)]$$



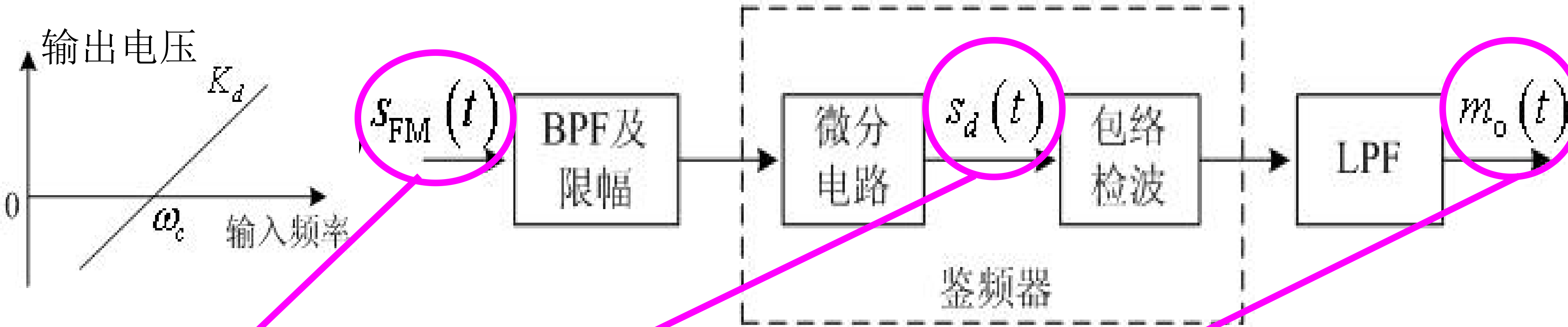
$$A\cos[\omega_c t+\varphi(t)]$$

$$\varphi(t)\rightarrow k\varphi(t) \quad\Rightarrow\quad m_f\rightarrow km_f$$

$$s_{NBFM}=A\cos(\omega_c t)-A\varphi(t)\sin(\omega_c t)$$

2. 调频信号的解调

1）非相干解调（适用于NBFM和WBFM信号）



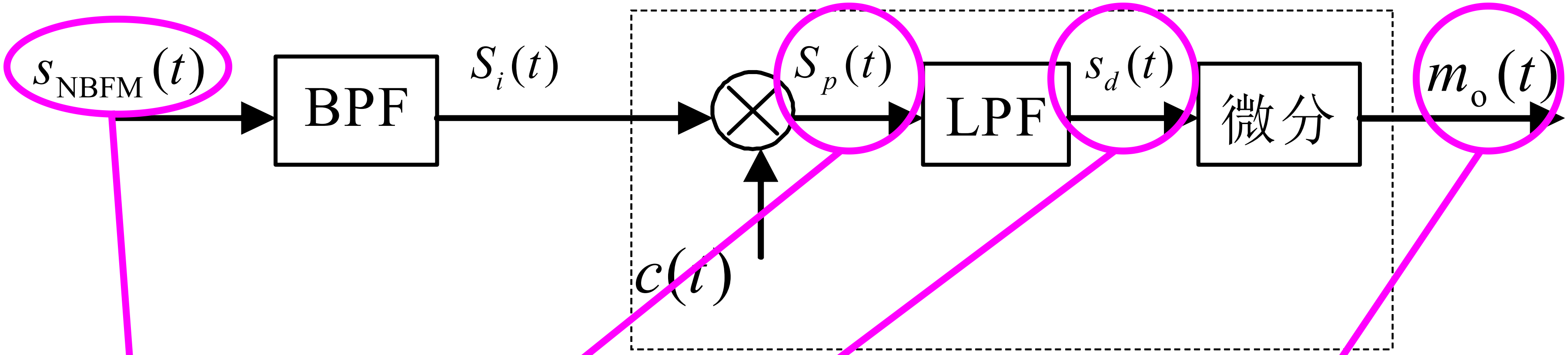
$$s_{FM}(t) = A\cos\left[\omega_c t + 2\pi K_f \int_{-\infty}^{t} m(\tau)d\tau\right]$$

$$s_d(t) = -A[\omega_c + 2\pi K_f m(t)]\sin[\omega_c t + 2\pi K_f \int_{-\infty}^{t} m(\tau)d\tau]$$

包络检波器提取出$s_d(t)$的包络，再经隔直与LPF得，

$$m_o(t) = 2\pi A K_d K_f m(t) \propto m(t)$$

2）相干解调（仅适用于NBFM信号）



$$s_{NBFM}(t) = A\cos\left(\omega_c t\right) - A\left[2\pi K_f \int_{-\infty}^{t} m(\tau)d\tau\right]\cdot\sin\left(\omega_c t\right)$$

设相干载波 $c(t) = -\sin\left(\omega_c t\right)$

$$s_p(t) = -\frac{A}{2}\sin\left(2\omega_c t\right) + \frac{A}{2}\left[2\pi K_f \int_{-\infty}^{t} m(\tau)d\tau\right]\left(1-\cos\left(2\omega_c t\right)\right)$$

$$s_d(t) = \pi A K_f \int_{-\infty}^{t} m(\tau)d\tau$$

$$m_0(t) = \pi A K_f m(t) \propto m\left(t\right)$$

总　　结

1 .$m_f \ll 1$为窄带角调制，m_f变大时为宽带角调制；

2. 卡森公式估算的带宽，包括了信号约98%的功率；

3. 载波的强度由 $J_0(m_f)$决定，选择合适的m_f ，可使载波功率减小或为零；

4. $m(t)$ 为单一频率，由它产生的**FM**或**PM**信号包含无穷多个边频分量，产生了新的频率分量，该调制为非线性调制。

第5章 模拟调制系统

核心内容----模拟信号的调制、解调

5.1 幅度调制（线性调制）的原理

5.2 角度调制（非线性调制）原理

5.3 各种模拟调制系统的比较

5.4 频分复用

5.3 各种模拟调制系统的比较

模拟通信系统的主要性能指标：

- * **有效性**　　用有效传输带宽来度量
- * **可靠性**　　用接收端最终输出信噪比来度量

各类通信系统的比较

比较前提：

①接收信号平均功率S_i相同；

②信道噪声功率谱密度 n_0 相同；

③同一基带信号，带宽为f_m。

调制方式	传输带宽	S_o/N_o	设备复杂程度	主要应用
AM	$2f_m$	$\left(\frac{S_o}{N_o}\right)_{AM}=\frac{1}{3}\left(\frac{S_i}{n_0 f_m}\right)$	简单	中短波无线电广播
DSB	$2f_m$	$\left(\frac{S_o}{N_o}\right)_{DSB}=\left(\frac{S_i}{n_0 f_m}\right)$	中等	应用较少
SSB	f_m	$\left(\frac{S_o}{N_o}\right)_{SSB}=\left(\frac{S_i}{n_0 f_m}\right)$	复杂	短波无线电广播、话音频分复用、载波通信、数据传输
VSB	略大于f_m	近似SSB	复杂	电视广播、数据传输
FM	$2(m_f+1)f_m$	$\left(\frac{S_o}{N_o}\right)_{FM}=\frac{3}{2}m_f^2\left(\frac{S_i}{n_0 f_m}\right)$	中等	超短波小功率电台（窄带 FM）；调频立体声广播等高质量通信（宽带 FM）

第5章 模拟调制系统

核心内容----模拟信号的调制、解调

5.1 幅度调制（线性调制）的原理

5.2 角度调制（非线性调制）原理

5.3 各种模拟调制系统的比较

5.4 频分复用

5.4 频分复用和调频立体声

5.4.1 频分复用

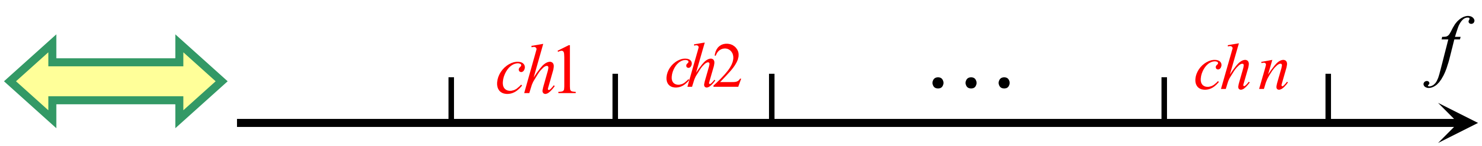
1. 复用的概念和分类

多路复用：将多路消息信号合并为一个复合的群信号，共同在一条信道上进行通信。

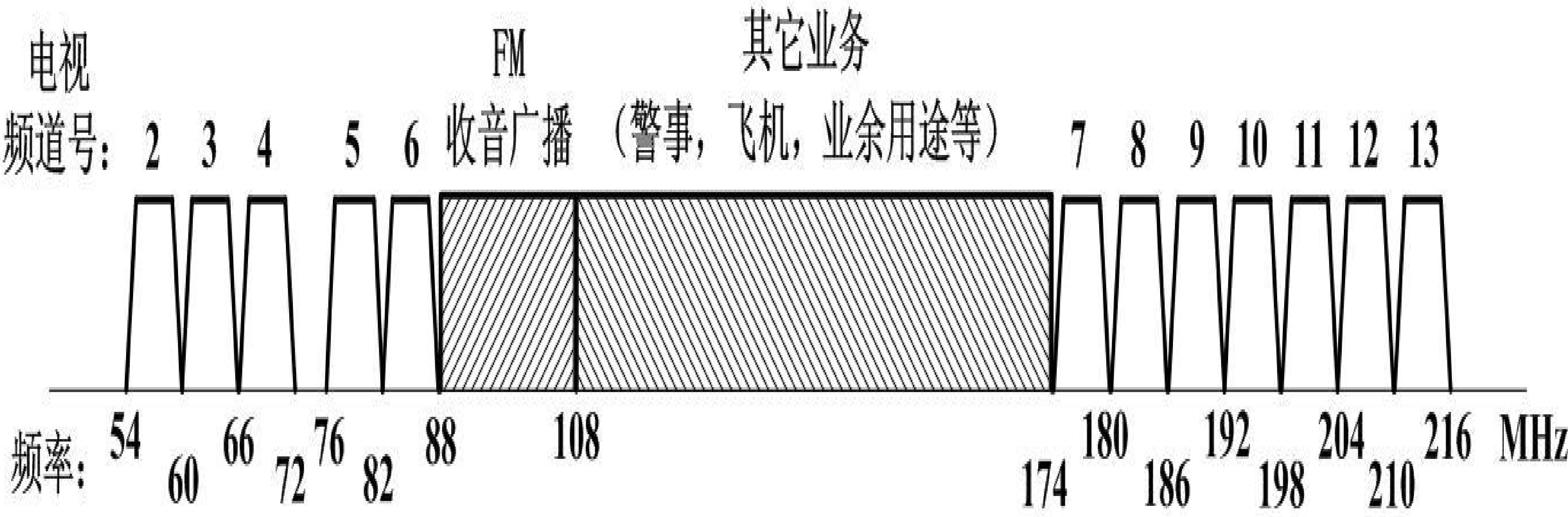
- 时分多路复用（TDM）
- 码分多路复用（CDM）
- 频分多路复用（FDM）

频分复用（FDM）——多个信号错开频率位置共用频带的方法

FDM



下图是多个电视频道、调频收音机广播以及其它无线电应用共用54-216MHz这段频带的示例：

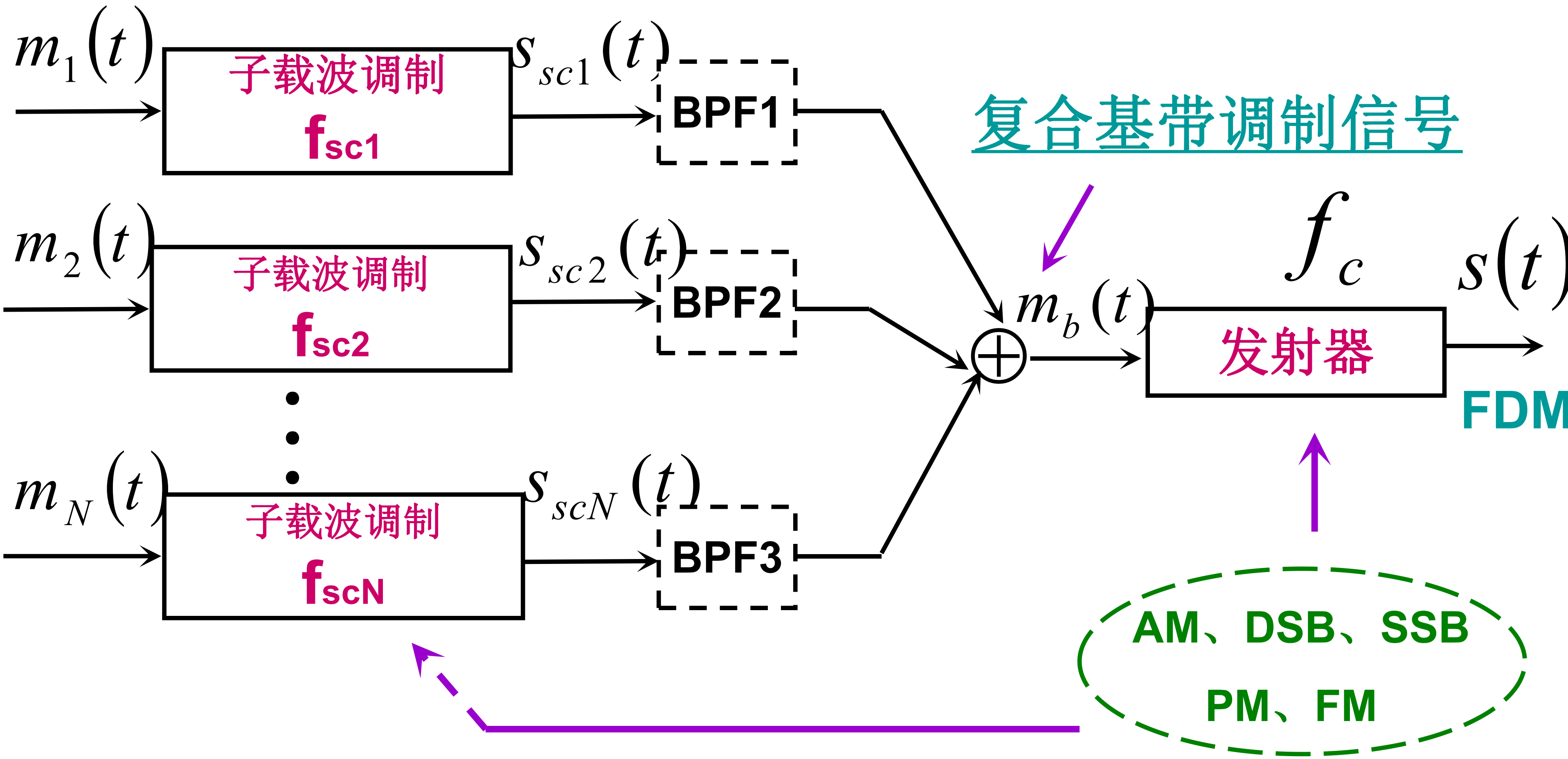


例 54～216MHz的FDM示意图

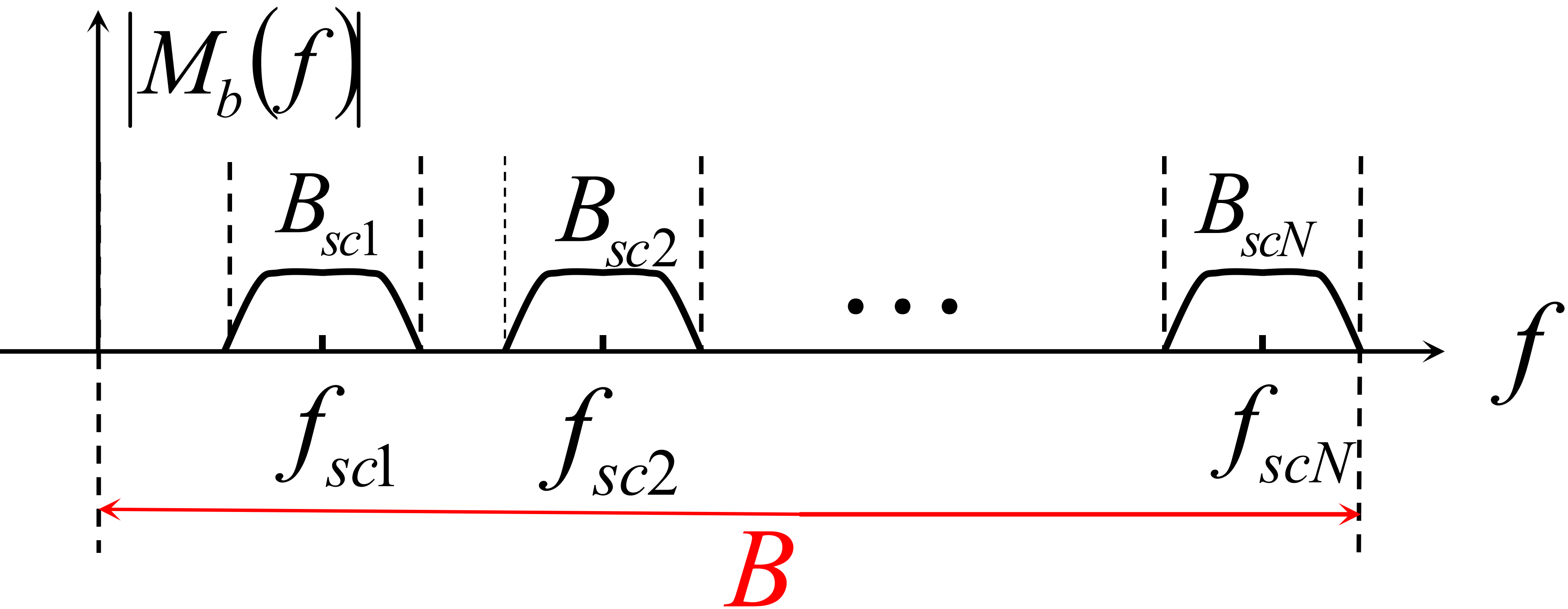
FDM也大量用在有线信道内：在电线或电缆内实行FDM即可让多个通信信号共享这条电线或电缆。

2. FDM的实现

（1）发射

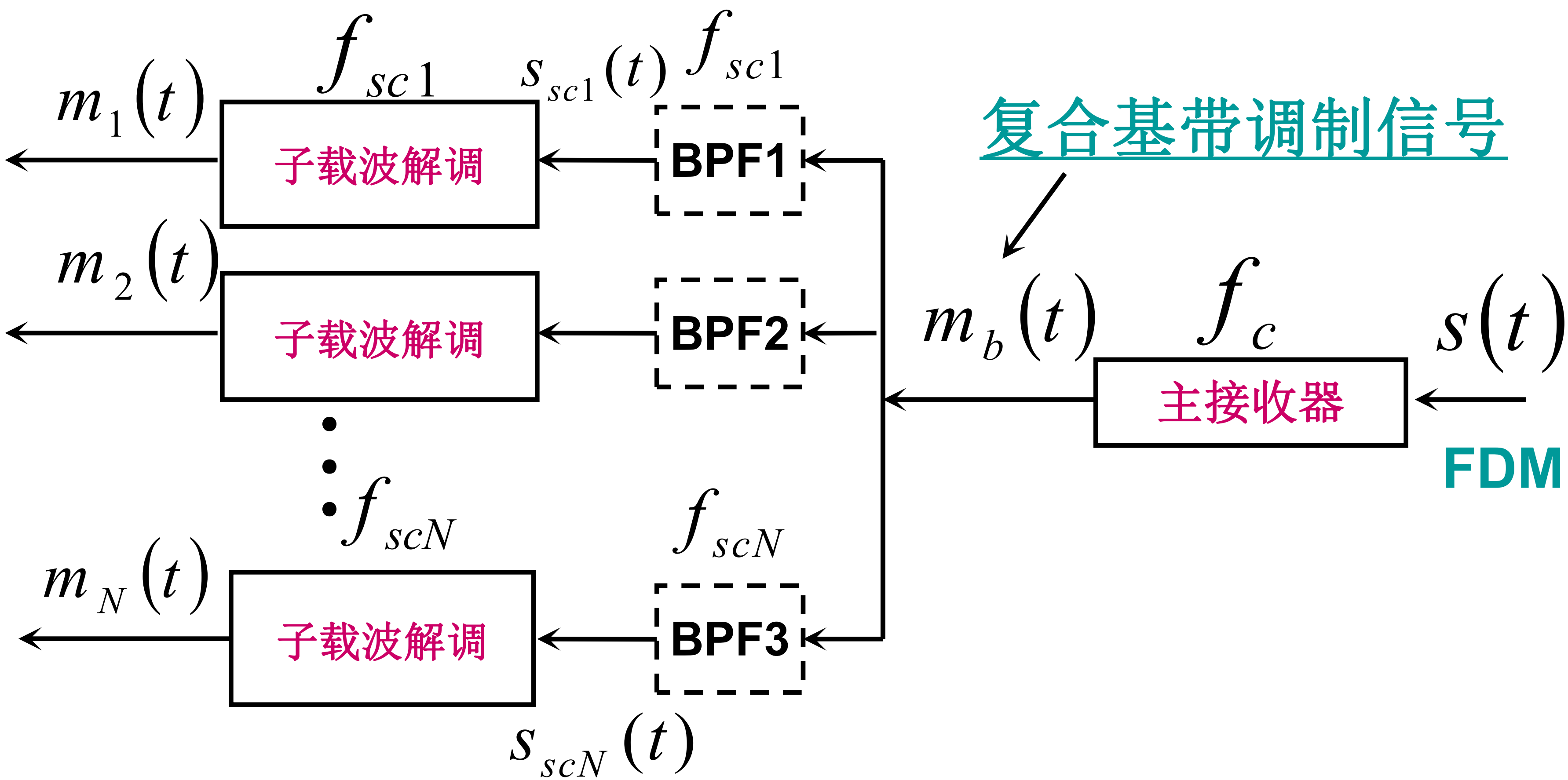


$m_1(t)$
子载波调制
f_{sc1}
$s_{sc1}(t)$
BPF1
$m_2(t)$
子载波调制
f_{sc2}
$s_{sc2}(t)$
BPF2
$m_N(t)$
子载波调制
f_{scN}
$s_{scN}(t)$
BPF3
复合基带调制信号
$m_b(t)$
f_c
发射器
$s(t)$
FDM
AM、DSB、SSB
PM、FM



$|M_b(f)|$
B_{sc1}
B_{sc2}
B_{scN}
$\cdots$
f
f_{sc1}
f_{sc2}
f_{scN}
B

（2）接收


$m_1(t)$
f_{sc1}
$s_{sc1}(t)$
f_{sc1}
子载波解调
BPF1
复合基带调制信号
$m_2(t)$
子载波解调
BPF2
$m_b(t)$
f_c
$s(t)$
主接收器
FDM
f_{scN}
f_{scN}
$m_N(t)$
子载波解调
BPF3
$s_{scN}(t)$


模拟调制系统
线性调制
AM 调幅
中波和短波的调幅广播
DSB 双边带调制
应用较少，一般用于点对点专用通信
SSB 单边带调制
频分复用、载波电话
VSB 残留边带调制
电视广播
非线性调制（角度调制）
FM 调频
窄带FM
超短波小功率电台
宽带FM
调频立体声广播、空间与卫星通信等高质量通信系统
PM 调相
性能比较
抗噪声性能
FM>DSB/SSB>VSB>AM
频谱利用率
SSB>VSB>DSB/AM>FM
功率利用率
FM>DSB/SSB>VSB>AM