第 6 章 振幅调制、解调及混频

第 6 章 振幅调制、解调及混频

振幅调制、解调及混频电路都属于频谱的线性搬移电路，是通信系数及其它电子系统的重要部件。

前面第五章学习了频谱线性搬移电路的原理电路，工作原理及特点，本章将介绍一些实用的频谱线性搬移电路。

6.1 振幅调制

调制——用调制信号去控制载波某个参数的过程。

振幅调制——用调制信号去**控制**高频振荡的**振幅**，使高频振荡的振幅按调制信号的规律变化。

振幅调制

- 幅度调制 ： AM （ Amplitude Modulation ）
- 双边带调制： DSB （ DoubleSide Band Modulation ）
- 单边带调制： SSB （ Single Side Band Modulation ）
- 残留边带调制： VSB （ Vestigial Side Band Modulation ）

6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

① 调幅波的分析

（1）表达式和波形

设调制信号： $u_\Omega = U_\Omega \cos \Omega t$

载波电压为： $u_C = U_C \cos \omega_c t$

一般 $\omega_c >> \Omega$

根据振幅调制的定义可知，已调信号 u_s 的振幅为：

$$U_m(t) = U_C + \Delta U_C(t) = U_C + k_a U_\Omega \cos \Omega t$$

则调幅信号为：$u_{AM}(t) = U_m(t) \cos(\omega_c t)$

6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

① 调幅波的分析

（1）表达式和波形

$$U_m(t) = U_C + k_a U_\Omega \cos\Omega t = U_C(1 + m\cos\Omega t)\cos(\omega_c t)$$

其中 $$m = \frac{\Delta U_C}{U_C} = \frac{k_a U_\Omega}{U_C}$$ —— 调幅度或调制度

k_a 为比例系数，又称调制灵敏度

上面的分析是在单一正弦信号作为调制信号的情况下进行的，而一般传送的信号并非为单一频率的信号，例如是一连续频谱信号 f(t)，则

$$u_{AM}(t) = U_C[1 + mf(t)]\cos\omega_c t$$

f（t）是均值为零的归一化调制信号，即$f(t)|_{\max} = 1$

6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

① 调幅波的分析

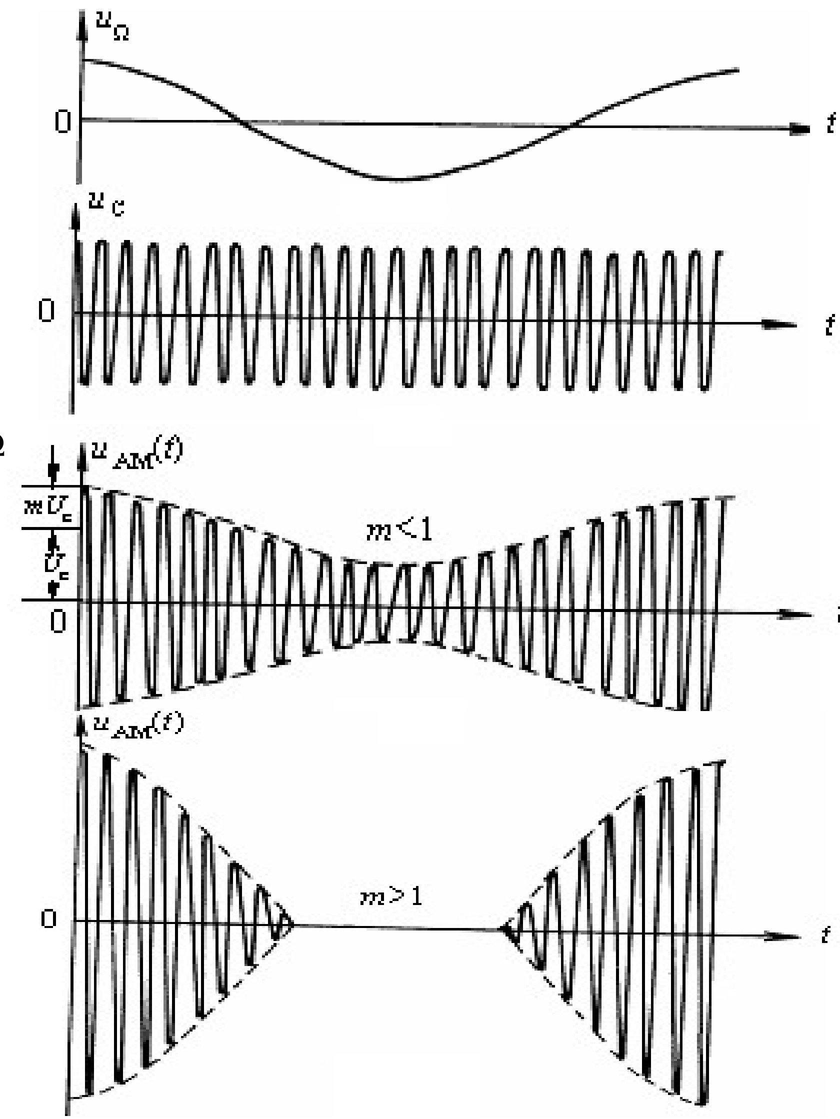
（1）表达式和波形

$$u_{AM} = U_C(1 + m\cos\Omega t)\cos(\omega_c t)$$

- 已调信号的包络正比于调制信号 u_Ω
- 用调制度 m 表示调制的深度。

当 m>1 时，会产生包络失真，

因此要求 m<=1，一般 m=0.3



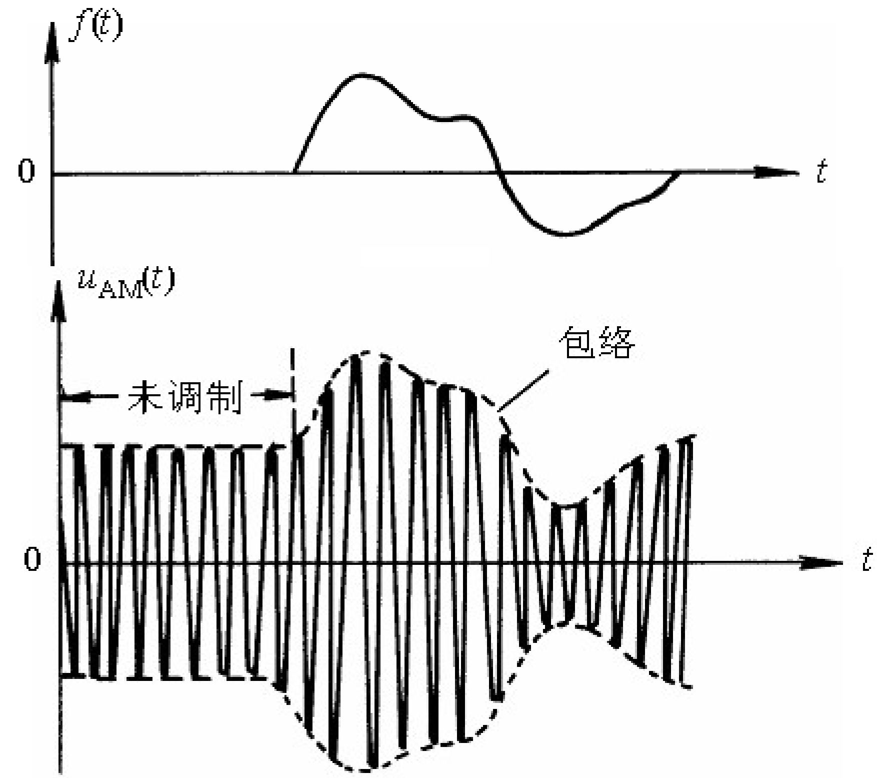
6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

① 调幅波的分析

（1）表达式和波形

$$u_{AM}(t) = U_C[1 + mf(t)]\cos\omega_c t$$



实际调制信号的调幅波形

6.1 振幅调制

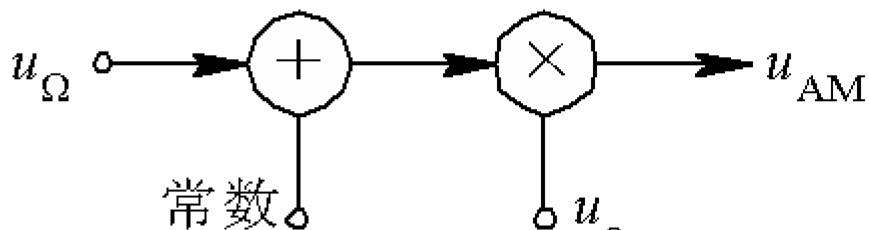
一、振幅调制信号分析

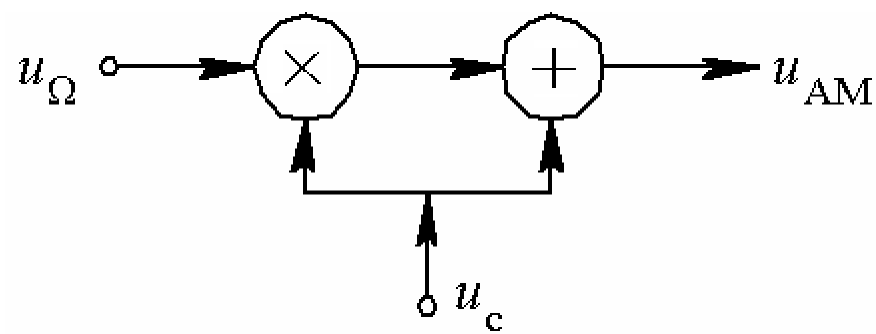
① 调幅波的分析

（1）表达式和波形

$$u_{AM} = U_C(1 + m\cos\Omega t)\cos(\omega_c t)$$

■产生方法

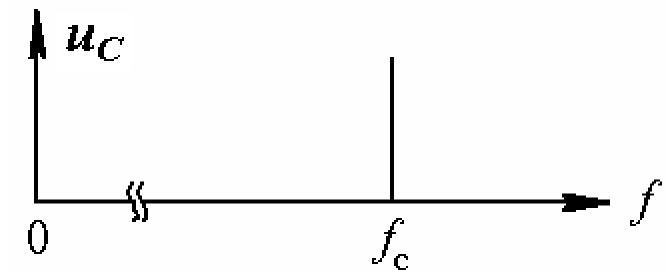




6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

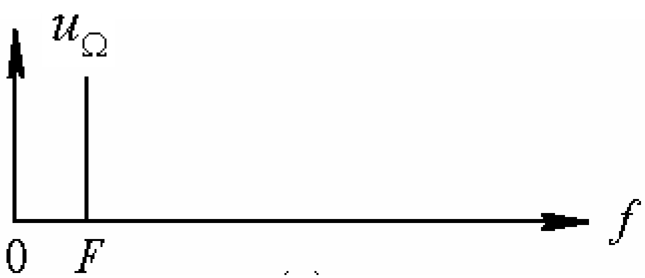
① 调幅波的分析

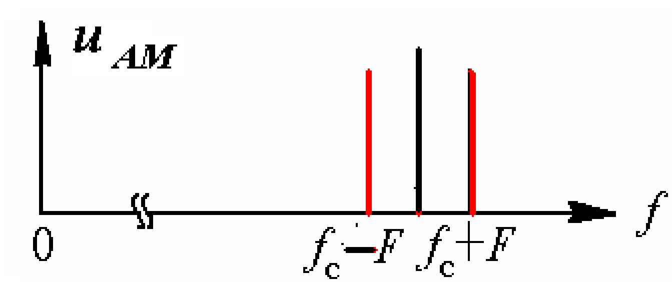


(2) 调幅波的频谱

由 $$u_{AM}(t) = U_C(1 + m\,\cos\Omega t)\cos(\omega_c t)$$

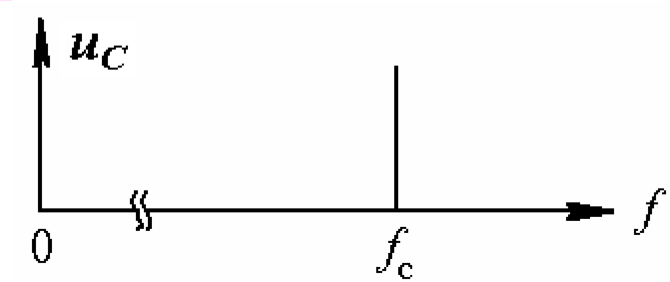
$$= U_C\cos\omega_c t + \frac{m}{2}U_C\cos(\omega_c + \Omega)t + \frac{m}{2}U_C\cos(\omega_c - \Omega)t$$





6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

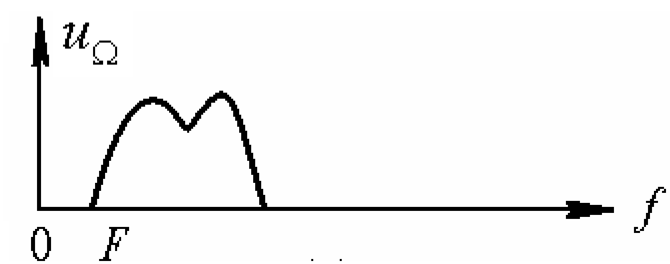


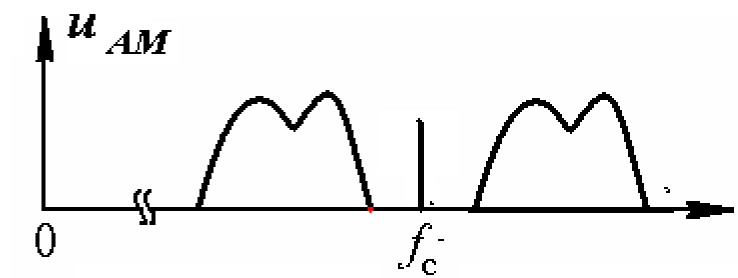
① 调幅波的分析

(2) 调幅波的频谱

若将调制信号分解为 $f(t)=\sum_{n=1}^{\infty} U_{\Omega n}\cos(\Omega_n t+\varphi_n)$

则调幅波表示式为 $u_{AM}(t)=U_C[1+\sum_{n=1}^{\infty} U_{\Omega n}\cos(\Omega_n t+\varphi_n)]\cos\omega_c t$

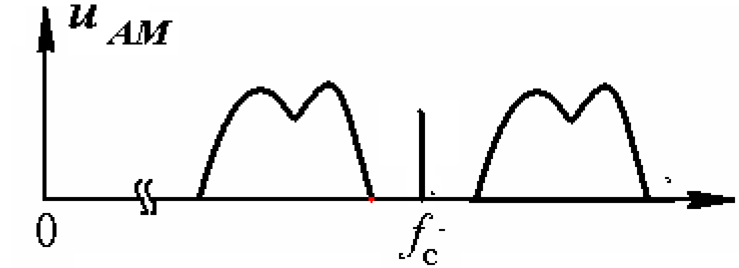


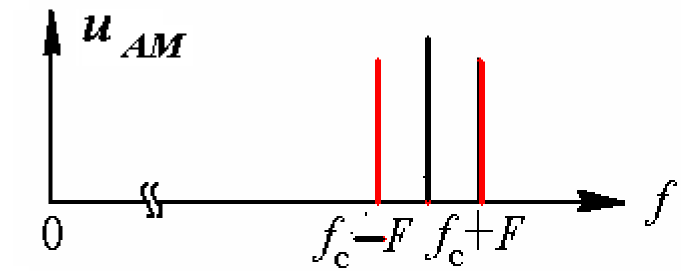


6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

① 调幅波的分析





由此可以看出，频谱的中心分量就是载波分量，与调制信号无关，不含消息，而两个边频分量 ω□Ω 则以 ω_c 为中心对称分布，边频幅度与调制信号幅度成正比，边频相对于载频的位置仅取决于调制信号的频率。

信号的幅度及频率消息只含于边频分量中。

AM 调制把调制信号的频谱搬移到载频两侧，在搬移过程中频谱结构不变。这类调制方式属于**频谱线性搬移**的调制方式。

6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

① 调幅波的分析

设负载为 R_L

(3) 调幅波的功率

瞬时功率：$P(t)=u_{AM}(t)i_{AM}(t)=\dfrac{u^2{}_{AM}(t)}{R_L}$

载波功率：$P_c=\dfrac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}\dfrac{u_C^2}{R_L}d\omega_c t=\dfrac{U_C^2}{2R_L}$

一个载波周期内，调幅波消耗的平均功率：

$$P=\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}\frac{u_{AM}^2(t)}{R_L}d\omega_c t=\frac{1}{2R_L}U_C^2(1+m\cos\Omega t)^2$$

$$=P_C(1+m\cos\Omega t)^2$$

6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

① 调幅波的分析

上、下边频的平均功率：

$$P_{边频}=\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}\frac{[1/2\, mU_C\cos(\omega_C \pm \Omega)t]^2}{R_L}\,d(\omega_C \pm \Omega)t$$

$$=\frac{1}{2R_L}\left(\frac{mU_C}{2}\right)^2=\frac{m^2}{4}P_c$$

$$P=P_C(1+m\cos\Omega t)^2$$

AM 信号平均功率： $P_{av}=\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}P\,d\Omega t=P_c\left(1+\frac{m^2}{2}\right)$

由上式可以看出 ,AM 波的平均功率为载波功率与两个边带功率之和。

而两个边频功率与载波功率的比值为： $\frac{边频功率}{载波功率}=\frac{m^2}{2}$

6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

① 调幅波的分析

$$P = P_C(1 + m\cos\Omega t)^2$$

调幅波的最大功率 $P_{\max} = P_c(1+m)^2$

调幅波的最小功率 $P_{\min} = P_c(1-m)^2$

分别对应调制信号的最大值和最小值

$$\frac{\text{边频功率}}{\text{载波功率}} = \frac{m^2}{2}$$

→ **当 *m*=1 时，边频功率为载波功率的 1/2，只占整个调幅波功率的 1/3。**

当 m 减小时，边频功率所占的比重更小。

而信号的幅度及频率消息只含于边频分量中。

→

普通的 AM 调制方式，载频与边带一起发送，功率浪费大，效率低。

但因为 AM 调制设备简单，尤其是 AM 解调简单，而且与其它调制方式相比，占用的频带窄，因此仍被广泛地应用于传统的无限电通信系统中。

6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

② 双边带信号

因为载波信号不携带消息，因此为了提高效率，可以考虑将载波信号抑制掉，这样既提高了效率，又不影响消息的传输。

将载波抑制掉的幅度调制——**抑制载波双边带调制，简称双边带调制（DSB）**

（1）波形和表达式

双边带调制信号可用载波与调制信号相乘得到：

$$u_{DSB} = kf(t)\cos(\omega_c t)$$

$$= ku_c u_\Omega = kU_C U_\Omega \cos(\Omega t)\cos(\omega_c t)$$

$$= g(t)\cos(\omega_c t)$$

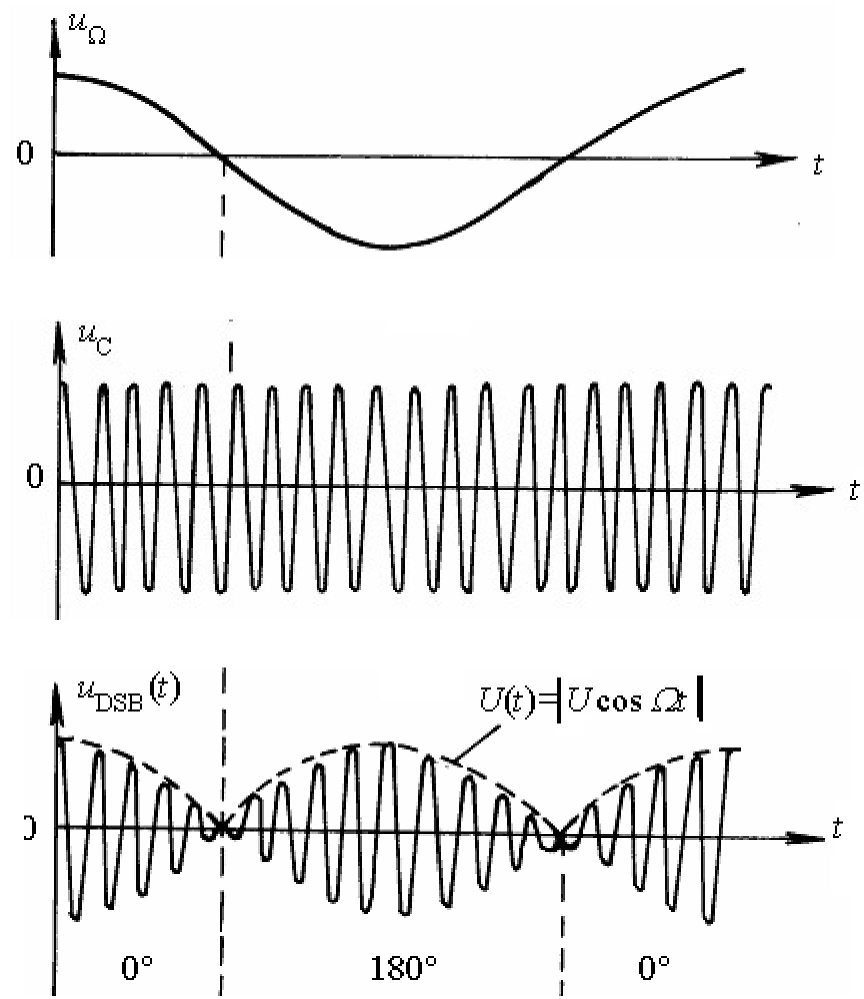
$g(t) = kU_C U_\Omega \cos(\Omega t)$ —— 双边带信号的振幅，与调制信号成正比

6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

② 双边带信号

（1）波形和表达式



$$u_{DSB} = kU_C U_\Omega \cos(\Omega t)\cos(\omega_c t)$$

■DSB 的包络正比于 $|u_\Omega|$ ，AM 调制，其包络正比于 u_Ω

■填充频率 fc

■DSB 的高频载波相位在调制电压零点处（调制电压正负交替时）要产生 180° 突变。

由图可见，在调制信号正半周期内，已调波的高频与原载频同相，在调制信号的负半周期内，已调波的高频与原载频反相，相差 180°，DSB 的

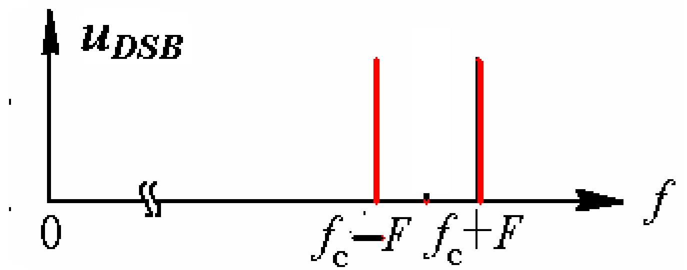
信号的极性。因此严格来说，DSB是**既调幅又调相**的信

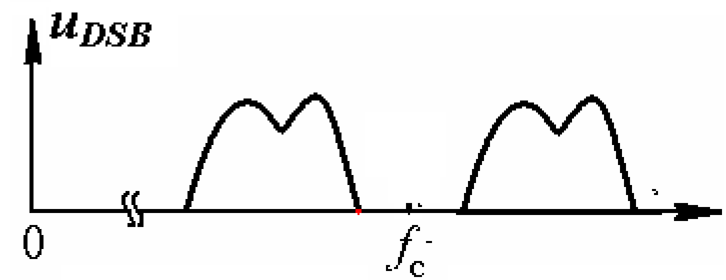
6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

② 双边带信号

（2）频谱





DSB 信号载频中无载频，功率利用率高于 AM 信号

6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

③ 单边带信号（SSB）

(1) 表达式

单边带信号是只取一个边带时的调制信号。

（SSB）信号是由 DSB 信号经边带滤波器滤除一个边带或在调制过程中，直接将一个边带抵消而成。

上边带 $u_{SSB}(t) = U\cos(\omega_c + \Omega)t$

下边带 $u_{SSB}(t) = U\cos(\omega_c - \Omega)t$

6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

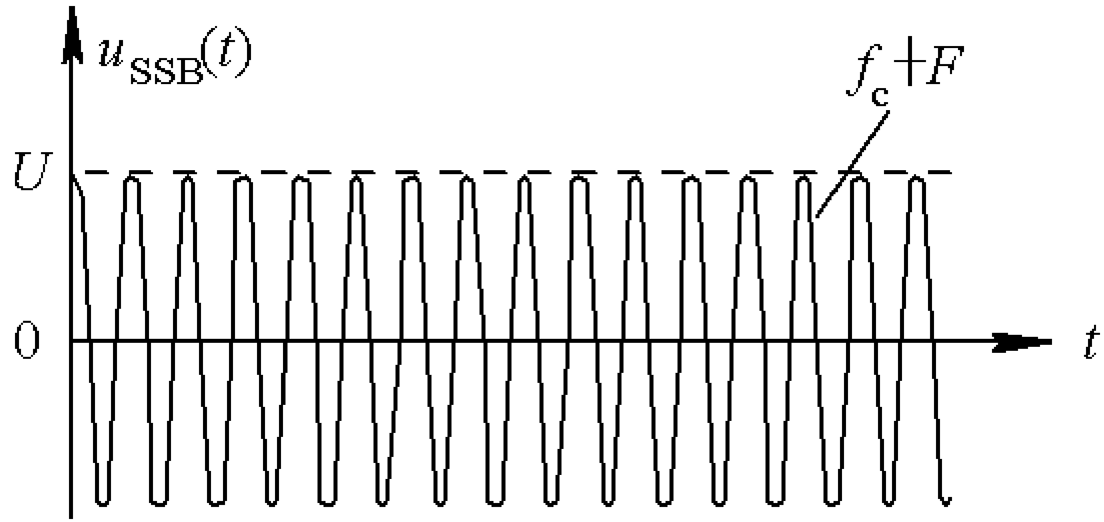
③ 单边带信号（SSB）

$$u_{SSB}(t) = U\cos(\omega_c - \Omega)t$$

$$u_{SSB}(t) = U\cos(\omega_c + \Omega)t$$

(2) 波形

从图中可以看出，单频调制时，SSB信号仍是等幅波。SSB信号的振幅与调制信号的幅度成正比，他的频率随调制信号频率的不同而不同，因此它含有消息特征。



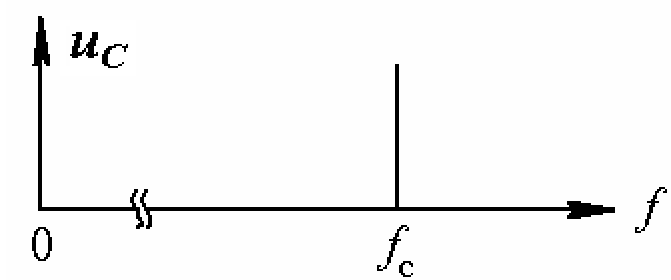
单边带信号的包络与调制信号的包络形状相同。在单频调制时，他们的包络都是一常数。

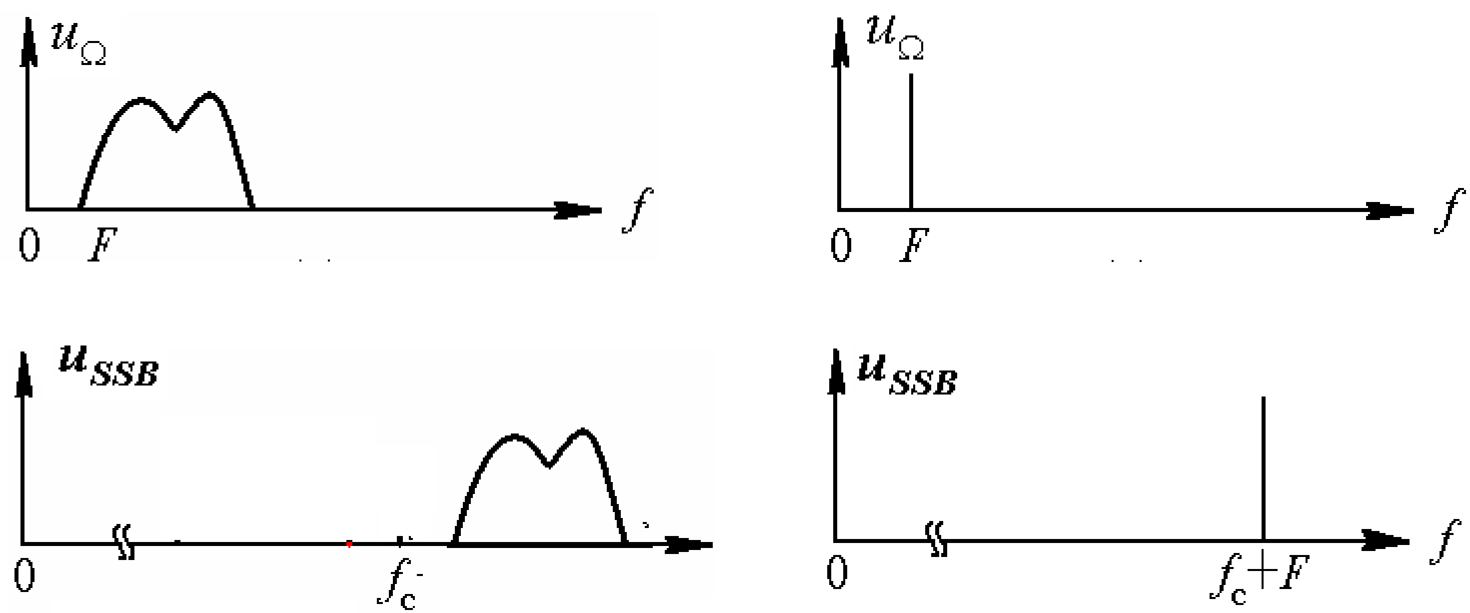
6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

③ 单边带信号（SSB）

(3) 频谱





6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

③ 单边带信号（SSB）

(4) 双音调制 SSB 信号

设双音频振幅相等，即 $u_\Omega(t)=U_\Omega\cos\Omega_1 t+U_\Omega\cos\Omega_2 t$

且 $\Omega_2>\Omega_1$，则可以写成下式：

$$u_\Omega=2U_\Omega\cos[\frac{1}{2}(\Omega_2-\Omega_1)t]\cdot\cos[\frac{1}{2}(\Omega_2+\Omega_1)t]$$

受 u_Ω 调制的双边带信号为

$$u_{DSB}=U\cos[\frac{1}{2}(\Omega_2-\Omega_1)t]\cdot\cos[\frac{1}{2}(\Omega_2+\Omega_1)t]\cos\omega_c t$$

从中任取一个边带，则

$$u_{SSB}=\frac{U}{2}\cos\frac{1}{2}(\Omega_2-\Omega_1)t\cdot\cos[\omega_c+\frac{1}{2}(\Omega_2+\Omega_1)]t$$

6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

③ 单边带信号（SSB）

(4) 双音调制 SSB 信号

$$u_{SSB}=\frac{U}{2}\cos\frac{1}{2}(\Omega_2-\Omega_1)t\,\cos[\omega_c+\frac{1}{2}(\Omega_2+\Omega_1)]t$$

展开有：

$$u_{SSB}=\frac{U}{4}\cos(\omega_c+\Omega_1)t+\frac{U}{4}\cos(\omega_c+\Omega_2)t$$

6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

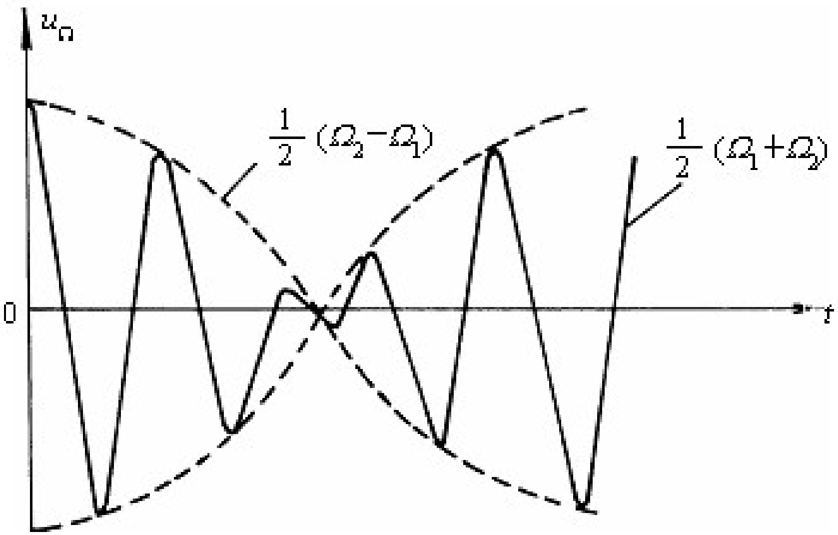
③ 单边带信号（SSB）

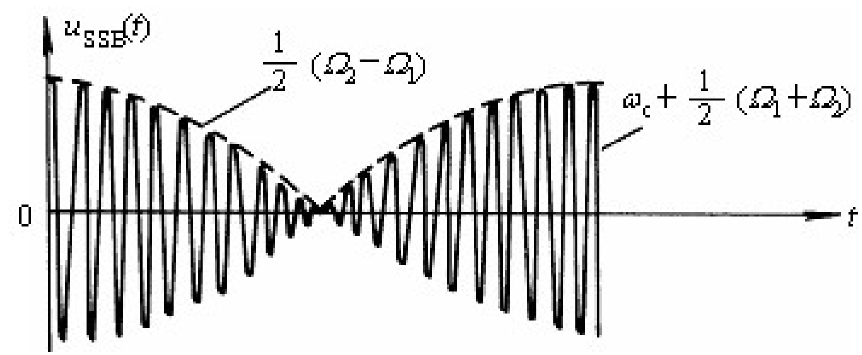
(4) 双音调制 SSB 信号

$$u_\Omega = 2U_\Omega \cos[\frac{1}{2}(\Omega_2 - \Omega_1)t] \cdot \cos[\frac{1}{2}(\Omega_2 + \Omega_1)t]$$

$$u_{SSB} = \frac{U}{2}\cos\frac{1}{2}(\Omega_2 - \Omega_1)t \cdot \cos[\omega_c + \frac{1}{2}(\Omega_2 + \Omega_1)]t$$

若将 $2U_\Omega \cos[\frac{1}{2}(\Omega_2 - \Omega_1)t]$ **看成是调制信号的包络，**$\frac{1}{2}(\Omega_2 + \Omega_1)$ **为调制信号的填充频率，则 SSB 信号的包络与调制信号的包络形状相同，填充频率移动了** w_c





6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

③ 单边带信号（SSB）

(4) 双音调制 SSB 信号

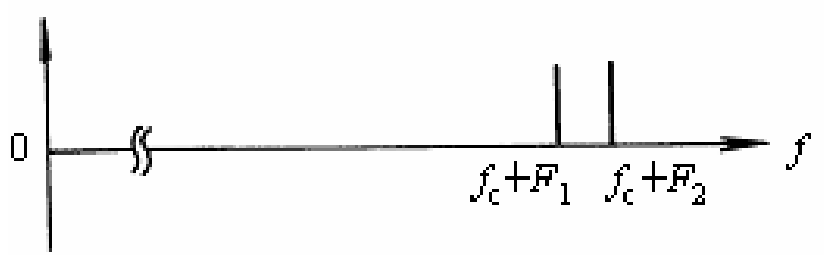
$$u_\Omega(t) = U_\Omega \cos\Omega_1 t + U_\Omega \cos\Omega_2 t$$

$$u_{SSB} = \frac{U}{4}\cos(\omega_c + \Omega_1)t + \frac{U}{4}\cos(\omega_c + \Omega_2)t$$

双音调制时，每一个调制频率分量产生一个对应的单边带信号分量，他们间的关系和单音调制时一样，振幅之间成正比，频率则线性移动。

该调制关系也适用于多频率分量信号 $f(t)$ 的 SSB 调制

等幅双音调制信号频谱



SSB信号频谱

6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

③ 单边带信号（SSB）

（5）一般信号的 SSB 调制

上边频：$u_{SSB}(t)=U\cos(\omega_c+\Omega)t$

下边频：$u_{SSB}(t)=U\cos(\omega_c-\Omega)t$

$u_{SSB}(t)=U\cos\Omega t\cdot\cos\omega_c t-U\sin\Omega t\cdot\sin\omega_c t$ —— 上边频

$u_{SSB}(t)=U\cos\Omega t\cdot\cos\omega_c t+U\sin\Omega t\cdot\sin\omega_c t$ —— 下边频

更一般地，设 $u_\Omega=f(t)$

则：$u_{SSB}=f(t)\cos(\omega_c t)\mp\hat{f}(t)\sin(\omega_c t)$

"—" 对应上边频，"+" 对应下边频

6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

③ 单边带信号（SSB）

$$u_{SSB}=f(t)\cos(\omega_c t)\mp\hat{f}(t)\sin(\omega_c t)$$

（5）一般信号的 SSB 调制

$$\hat{f}(t)=\frac{1}{\pi t}*f(t)=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{f(\tau)}{t-\tau}d\tau$$ ——f(t) 的希尔伯特变换

因为： $$\frac{1}{\pi t}\leftrightarrow -j\,\mathrm{sgn}(\omega)$$

故 $\hat{f}(t)$ 的付立叶变换为 $$\hat{F}(\omega)=-j\,\mathrm{sgn}(\omega)F(\omega)=F(\omega)e^{-j\frac{\pi}{2}\mathrm{sgn}(\omega)}$$

$F(\omega)$ 的各频率分量移相 -π/2，就可得到 $\hat{f}(t)$

令： $H(j\omega)=e^{-j\frac{\pi}{2}\mathrm{sgn}(\omega)}$ 　则： $\hat{F}(\omega)=F(\omega)H(j\omega)$

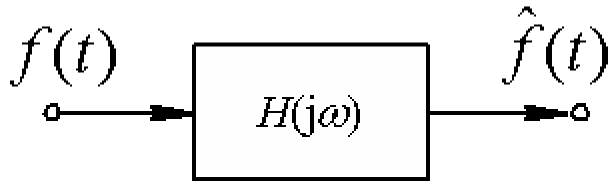
6.1 振幅调制

一、振幅调制信号分析

③ 单边带信号（SSB）

（5）一般信号的 SSB 调制

$$\hat{F}(\omega)=F(\omega)H(j\omega)$$



希尔伯特变换网络

$$H(j\omega)=e^{-j\frac{\pi}{2}}\operatorname{sgn}(\omega)$$ —— 传递函数