

信号与系统A Signals and Systems

第8章 通信系统

张建国

西安交通大学
电子与信息工程学院

2016年5月23日



引言

在通信系统中调制与解调是一种基本的技术。

调制是指用一个信号去控制另一个信号的参量的过程。被控制的信号称为载波 (Carrier Wave)。控制信号称为调制信号 (Modulation Signal)，也称为基带信号。调制产生的信号称为已调信号。从已调信号中提取控制信号的过程称为解调。

在通信系统中调制是被广泛采用的技术。因为：

- ① 不同频率的信号有不同的传播特性，往往将信号调制到易于传播的频率上；
- ② 使用调制可以很容易地实现FDM（频分复用）。

依据载波的不同可以分为：正弦调制和脉冲调制等。根据调制参量的不同，正弦调制可以分为：幅度调制，相位调制，频率调制。脉冲调制可以分为：幅度调制，脉宽调制等。



本章内容与基本要求

- ① 引言
- ② 复指数与正弦幅度调制
- ③ 正弦AM的解调
- ④ 频分多路复用
- ⑤ 单边带正弦幅度调制
- ⑥ 用脉冲串作载波的调制
- ⑦ 本章小结

基本要求

- ① 掌握连续时间正弦幅度调制的基本原理及在频域分析通信系统的基本方法；
- ② 掌握脉冲串载波调制的基本原理及解调方法；
- ③ 频分复用和时分复用的概念；对通信中常用的基本调制方式及频域分析在通信领域的某些应用有初步认识。

8.0 引言



正弦幅度调制 (DSB)

幅度调制的数学模型是乘法器。

$x(t)$ 为调制信号 (基带信号), $c(t)$ 为载波, $y(t) = x(t)c(t)$ 为已调信号。

当 $c(t) = \cos(\omega_c t + \theta_c)$ 时称为正弦幅度调制。若暂时不考虑载波的相位, 即

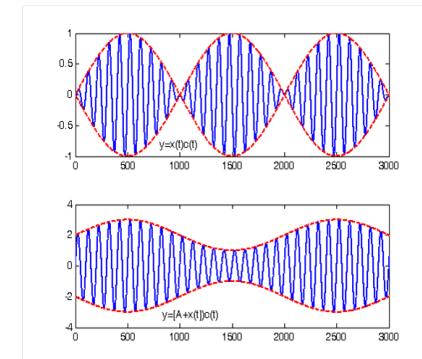
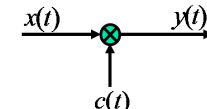
$$y(t) = x(t) \cos \omega_c t$$

此时载波的频谱为：

$$C(j\omega) = \pi [\delta(\omega - \omega_c) + \delta(\omega + \omega_c)]$$

已调信号的频谱为：

$$Y(j\omega) = \frac{1}{2\pi} X(j\omega) * C(j\omega) = \frac{1}{2} \{X[j(\omega - \omega_c)] + X[j(\omega + \omega_c)]\}$$





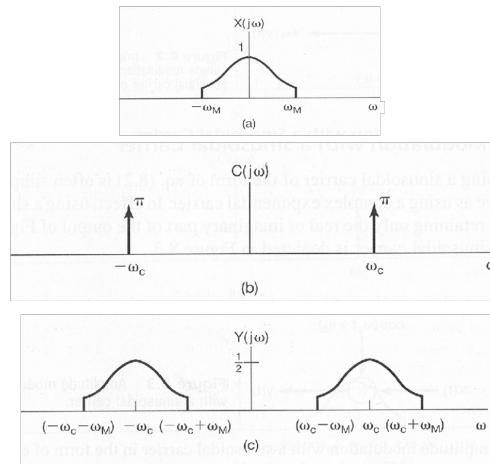
正弦幅度调制的频域特性

表明：对基带信号进行正弦幅度调制，就等于在频域将基带信号的频谱搬移到载频的位置。

为了在接收端能从 $y(t)$ 恢复成 $x(t)$ ，要求在频谱搬移的过程中不能发生频谱重叠。

为此，应满足：

- ① $x(t)$ 必须带限于 ω_M
- ② $\omega_c > \omega_M$



正弦幅度调制的同步解调

将 $y(t)$ 再次与同频载波相乘，有：

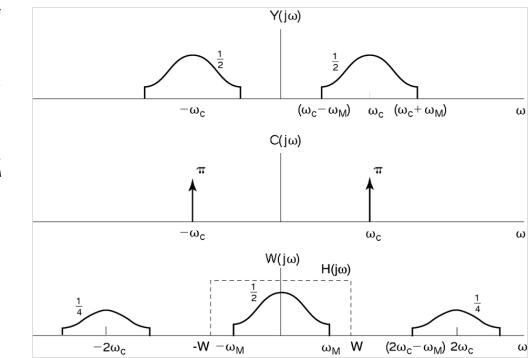
$$w(t) = y(t) \cos \omega_c t = x(t) \cos^2 \omega_c t = \frac{1}{2} x(t) + \frac{1}{2} x(t) \cos 2\omega_c t$$

显然，只要滤掉第二项即可实现对 $x(t)$ 的恢复。

解调端所用的载波必须与调制时的载波完全同频。

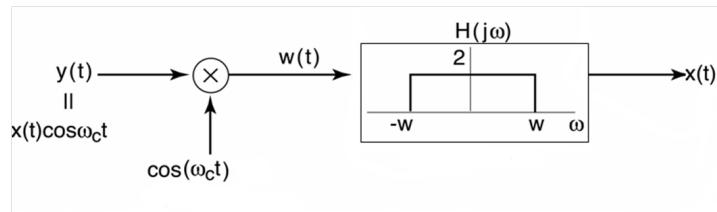
所用理想低通滤波器的截止频率要满足：

$$\omega_M < W < 2\omega_c - \omega_M$$



正弦幅度调制的同步解调载波误差影响

此时，可采用如下系统实现解调：



假定调制时的载波 $c_1(t) = \cos(\omega_c t + \theta_c)$ ，
解调时的载波 $c_2(t) = \cos(\omega_c t + \varphi_c)$ ，则

$$\begin{aligned} w(t) &= x(t) \cos(\omega_c t + \theta_c) \cdot \cos(\omega_c t + \varphi_c) \\ &= \frac{1}{2} x(t) \cos(\theta_c - \varphi_c) + \frac{1}{2} x(t) \cos(2\omega_c t + \theta_c + \varphi_c) \end{aligned}$$

经过上图所示滤波器后： $v(t) = x(t) \cos(\theta_c - \varphi_c)$



正弦幅度调制的同步解调载波误差影响

$$v(t) = x(t) \cos(\theta_c - \varphi_c)$$

$\theta_c - \varphi_c$ 不随时间变化，因此 $\cos(\theta_c - \varphi_c)$ 是一个常数。

当 $\theta_c - \varphi_c = \pm\pi/2$ 时，由于 $\cos(\theta_c - \varphi_c) = 0$ ，因此不能实现解调。

当 $\theta_c - \varphi_c \neq \pm\pi/2$ 时，可以通过前面讨论的解调系统实现解调。实际上，如果 $\cos(\theta_c - \varphi_c)$ 很小，信噪比会很差，也很难正确解调。

可见，必须要求调制和解调时所使用的载波不仅要严格同频，而且要相位同步(以保证 $\theta_c = \varphi_c$ 或 $\theta_c \approx \varphi_c$)。因此这种解调方法称为**同步解调**。

工程中采用锁相技术以保证相位和频率同步。

由于在已调信号的频谱中同时保留了基带信号的上、下两个边带，故称其为双边带(DSB)调制。

讨论：上述要求同步解调的本质原因是什么，什么信息量丢失了？



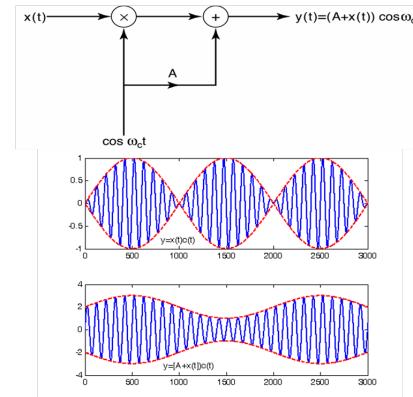
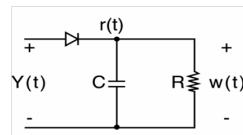
正弦幅度调制的非同步解调(包络解调)

要想从已调信号的包络解调出原基带信号，必须要求已调信号的包络完全保持基带信号的形状，即要求调制信号始终非负。为此，要在DSB调制方案中加入足够大的载波分量。

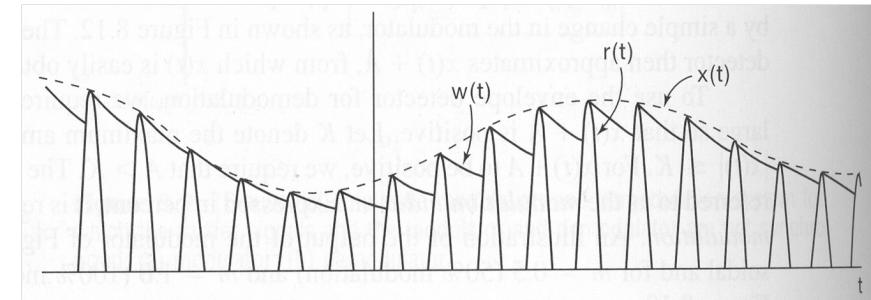
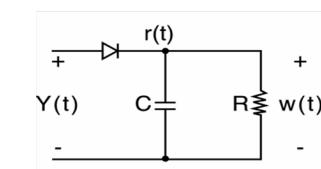
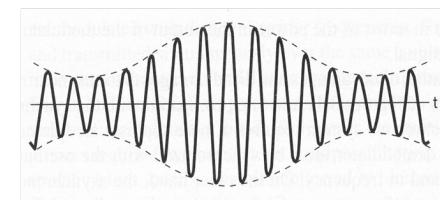
$$y(t) = [A + x(t)] \cos \omega_c t$$

当 $A \geq |x(t)|_{\max}$ 时，即可保证 $A + x(t) \geq 0$ 已调信号的包络将会保留 $x(t)$ 的形状。

此时只需通过简单的包络检波器即可实现从已调信号中解调出 $x(t)$ 。



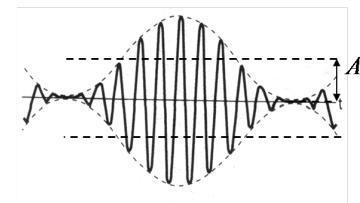
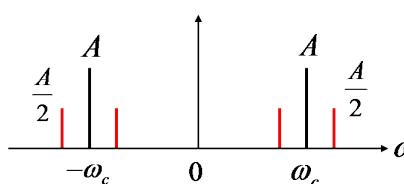
正弦幅度调制的非同步解调(包络解调)



正弦幅度调制的非同步解调(包络解调)

包络解调付出的代价是发送功率的浪费。因为加入的载波并不携带任何有用信息，这部分功率的发射对有用信息的传输是无益的。

如果 $|x(t)|_{\max} = K$ ，定义 K/A 为调制指数 m ，显然 $0 < m \leq 1$ 。当调制信号是单音正弦时，在 $m = 1$ 的情况下，已调信号的频谱如下：



此时，已调信号的平均功率是载波功率的1.5倍，而这些功率中真正用于传输有用信息的边带功率只是载波功率的1/2，只占整个已调信号总功率的1/3。



正弦幅度调制的非同步解调(包络解调)

已调信号的最大峰值等于载波峰值的2倍。这就要求发射机的峰值功率容限是载波功率的4倍，发射机的效率是很低的。

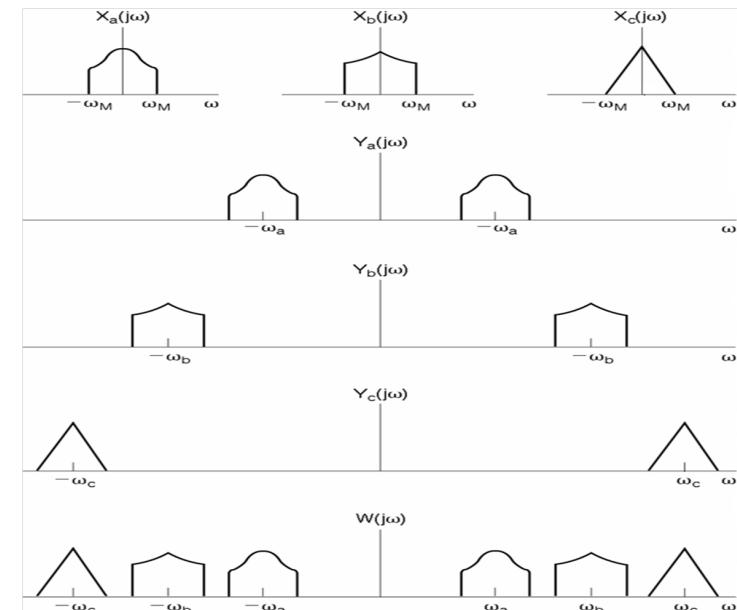
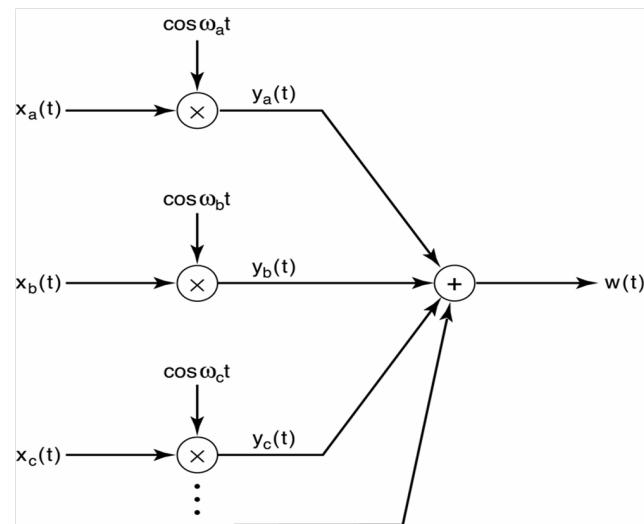
$$\eta_{\max} = \frac{1.5P_c}{4P_c} = \frac{3}{8} = 37.5\%$$

从功率利用的角度， m 越大越好；从包络检波的效果来看， m 越小越好。因此，在包络解调中，通常折衷地取 $m = 0.5 \sim 0.8$ 。

信道往往具有比信号带宽大得多的频带。如果在一个信道中只能传输一路信号，显然对有限的信道频率资源是一种浪费。利用频分复用可以在同一宽带信道内传输多路窄带信号。（例如：载波电话）

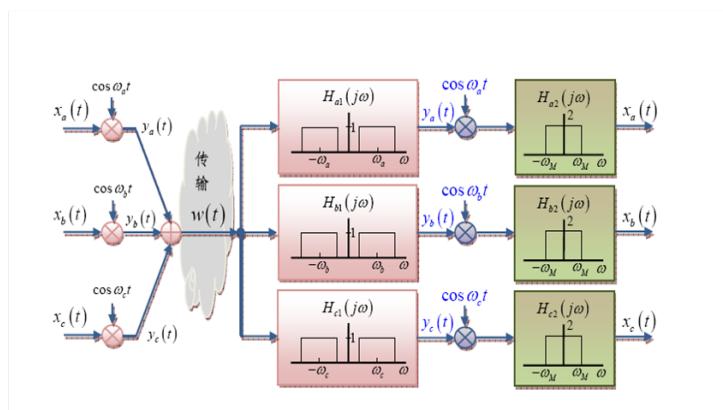


频分复用



频分复用

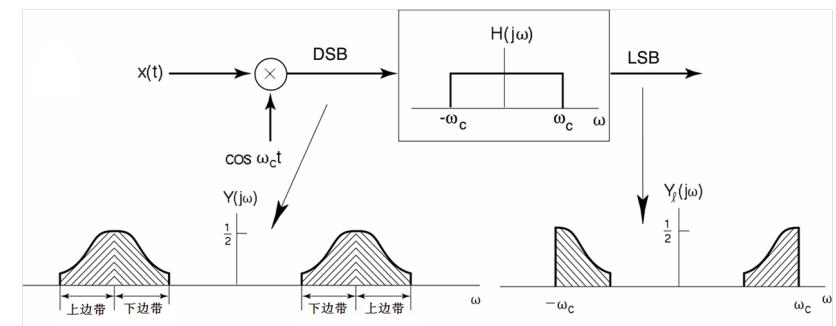
对频分多路复用信号解调时，首先要解复用：从复用信号的频谱中利用带通滤波器滤出所需的一路信号，然后对该路信号进行解调。



单边带信号的生成—滤波法

DSB正弦幅度调制的已调信号中有冗余，频带利用率低。实际上，仅保留一半的频带就足以恢复原信号了，称这种调制为单边带调制。

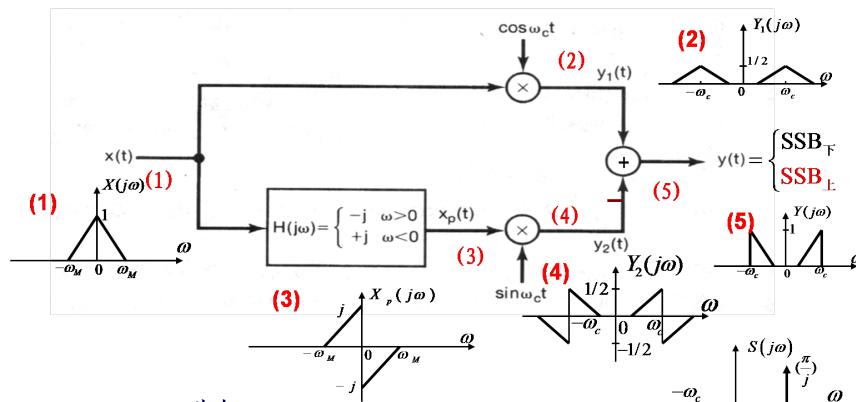
利用锐截止的带通或高通边带滤波器，滤除一个边带可以实现单边带调制。



SSB调制提高了频谱利用率，代价是增加了调制器的复杂性。

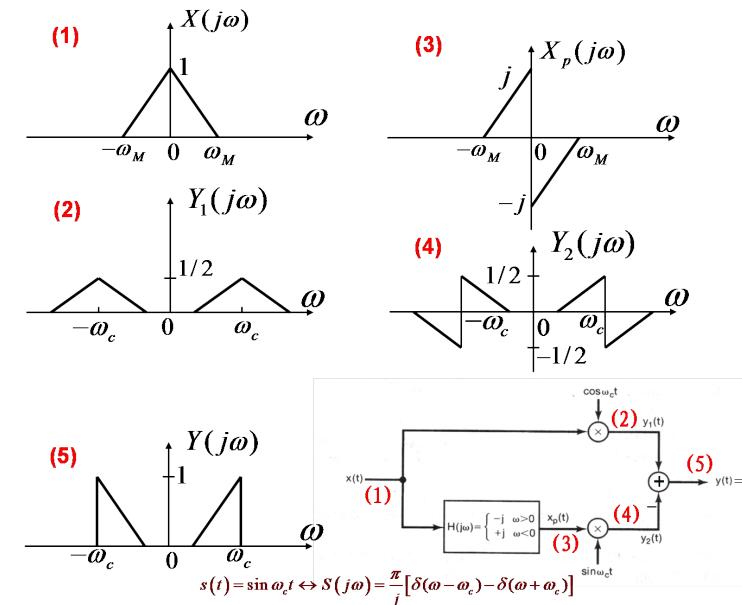


单边带信号的生成—移相法



其中：

$$s(t) = \sin \omega_c t \Leftrightarrow S(j\omega) = \frac{\pi}{j} [\delta(\omega - \omega_c) - \delta(\omega + \omega_c)]$$



脉冲串载波幅度调制的时域和频域分析

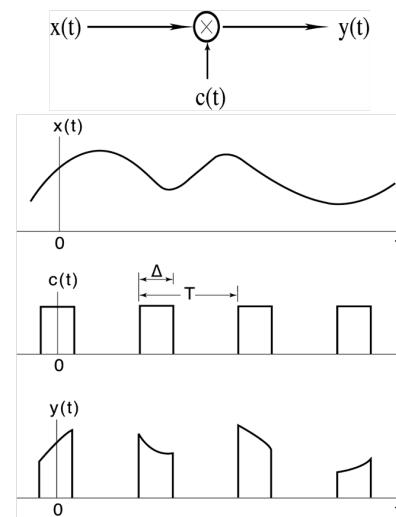
当幅度调制的载波信号是脉冲串时，称为脉冲串载波调制。

$$y(t) = x(t)c(t)$$

$$C(j\omega) = 2\pi \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k \delta(\omega - \frac{2\pi}{T}k)$$

$$a_k = \frac{\sin \frac{\Delta\pi}{T} k}{\pi k}$$

$$\begin{aligned} Y(j\omega) &= \frac{1}{2\pi} X(j\omega) * C(j\omega) \\ &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k X \left[j(\omega - \frac{2\pi}{T}k) \right] \end{aligned}$$



脉冲串载波幅度调制的频域分析

只要调制信号 $x(t)$ 的最高频率 ω_M 满足 $2\omega_M < 2\pi/T$ ，即可保证在输出 $Y(j\omega)$ 中不发生频谱的重叠，可以用理想低通滤波器从已调信号中解调出 $x(t)$ 。

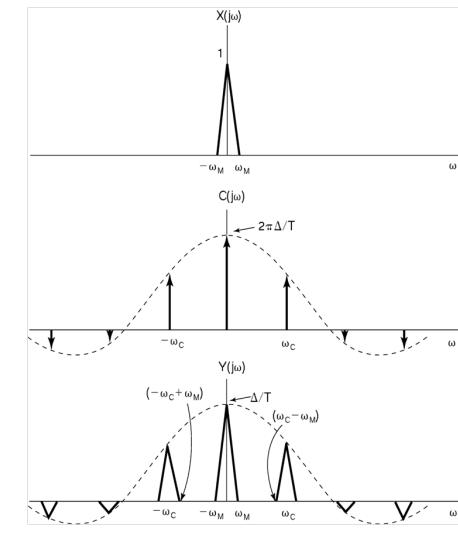
低通的截止频率 W 要满足：

$$\omega_M < W < \omega_c - \omega_M$$

$$a_k = \frac{\sin \frac{\Delta\pi}{T} k}{\pi k}$$

由 $Y(j\omega)$ 的频谱可以看出，其在频域上的幅度与 Δ/T 有关。

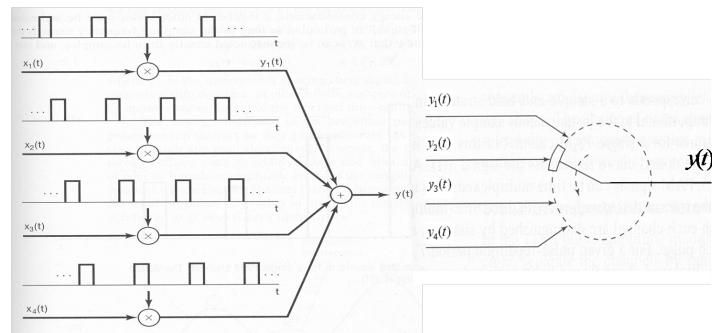
值得注意的是，上述结论对其它形状的周期性脉冲载波波形也都成立。如何恢复主要考虑系数 a_k 。





时分多路复用和解复用

在脉冲串载波的每一个周期里，依次为各路信号分配一个相应的时隙，在该时隙内传送这一路信号。只要各路信号的时隙彼此不重叠，就可以实现多路信号的同时传送。在接收端通过循徊时序提取实现解复用。



本章小结

本章作为傅立叶分析在通信领域的应用：

- 讨论了与通信系统有关的基本概念，特别是通信系统中普遍采用的调制技术。
- 以正弦信号作为载波，讨论了DSB、AM以及SSB调制的调制与解调方案。讨论了频分复用技术。
- 讨论了脉冲串载波调制及时分多路复用。

作业：

CH8-1: 8.4, 8.9, 8.21, 8.22。

CH8-2: 8.12, 8.24, 8.28, 8.36, 8.40。

注意：8.4中，截止频率为 400π 改为 500π 。

习题勘误：

8.36(b)中， ω_r 必须满足应为 ω_T 必须满足。