

Teoria das Comunicações

3.1 – Modulação em Amplitude (AM) DSB-SC

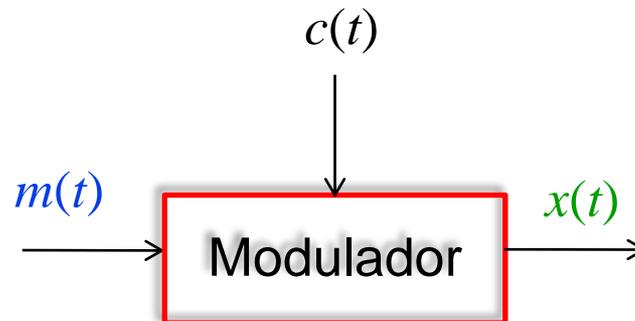
MODULAÇÃO

Modulação

- Uma portadora é um sinal sinusoidal de alta frequência f_c

$$c(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta)$$

- **Modulação** é o processo em que algum parâmetro de uma portadora é modificado de acordo com um **sinal mensagem**, gerando um **sinal modulado**



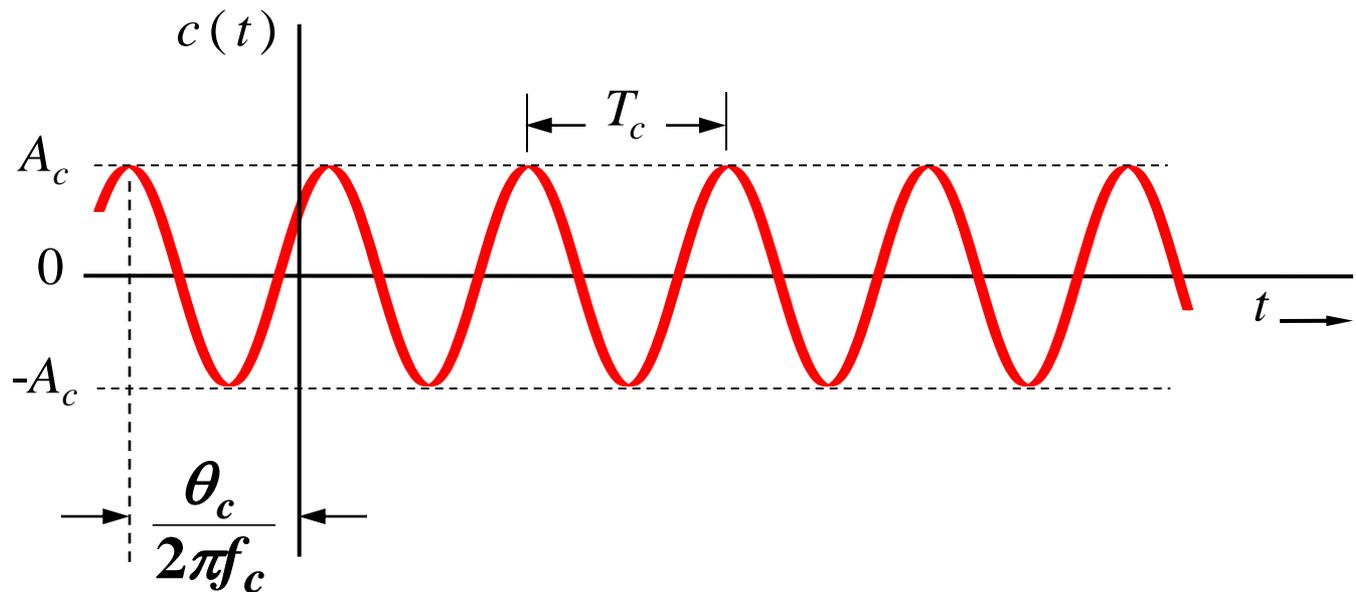
Portadora

$$c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \theta_c)$$

Amplitude da portadora
(em volts, V)

Frequência da portadora
(em hertz, Hz)

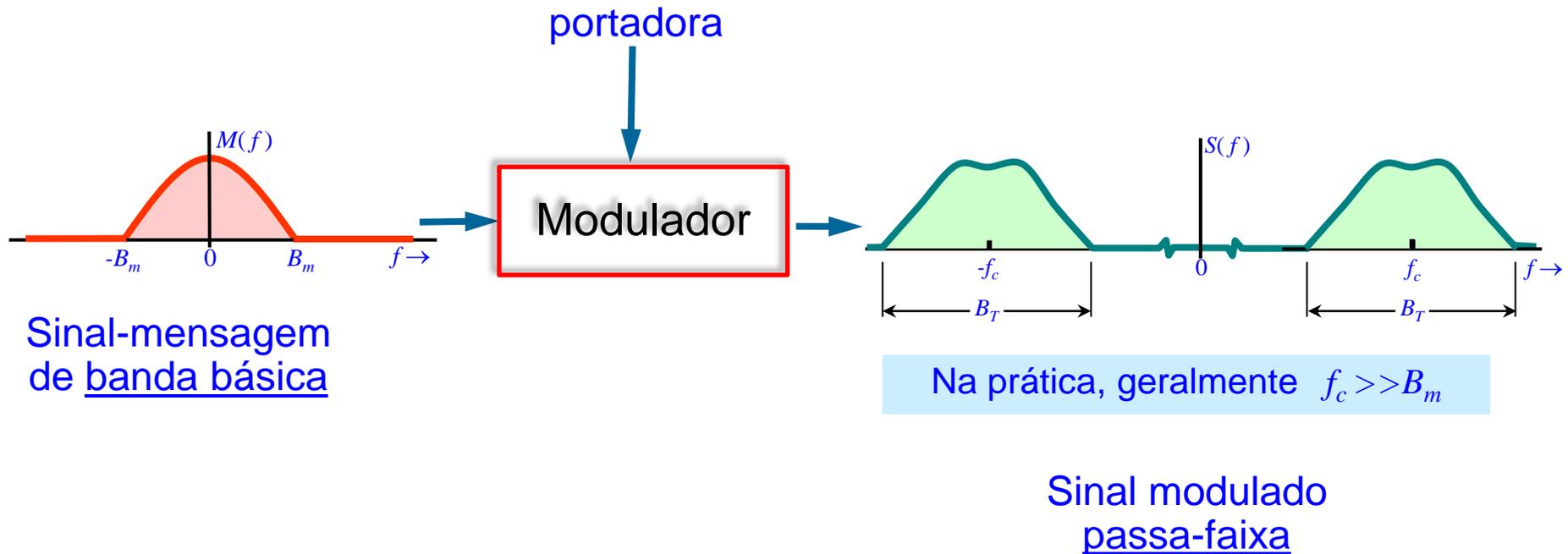
Fase relativa da portadora (em
radianos, rad, ou graus)



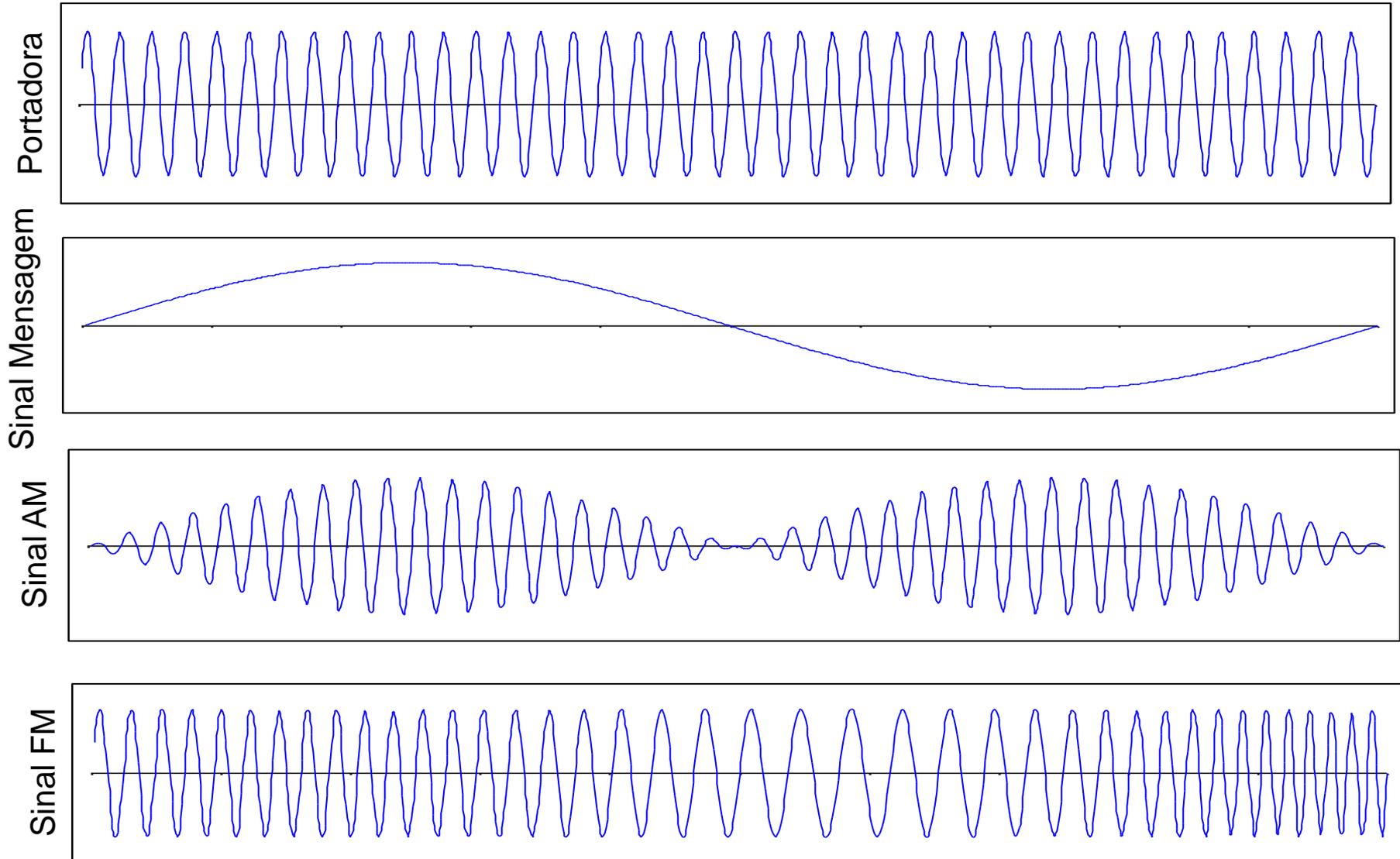
$$T_c = \frac{1}{f_c}$$

Modulação Analógica

- Converte um sinal-mensagem analógico de banda básica em um sinal analógico de alta frequência em banda passante



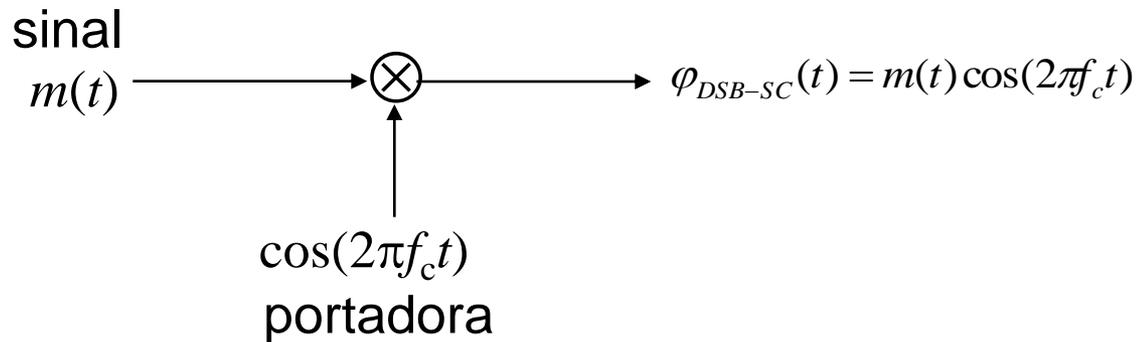
Exemplos de Modulação



MODULAÇÃO AM DSB-SC

Modulação AM DSB-SC

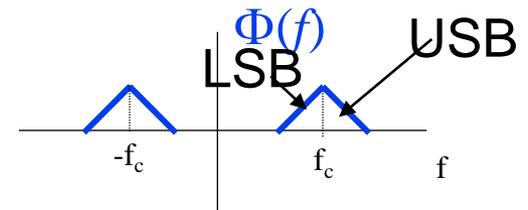
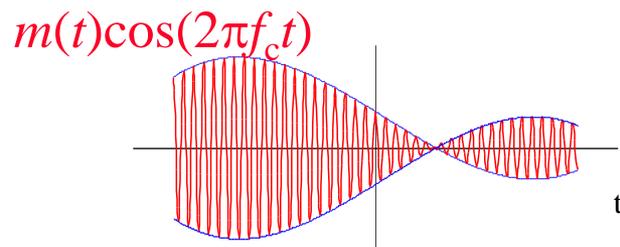
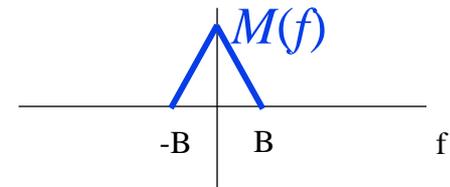
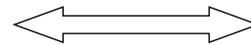
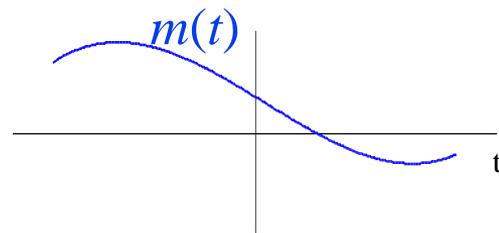
- **D**ouble **S**ide **B**and – **S**uppressed **C**arrier
- Dado um sinal de banda base $m(t)$
- Amplitude da portadora varia de acordo com sinal



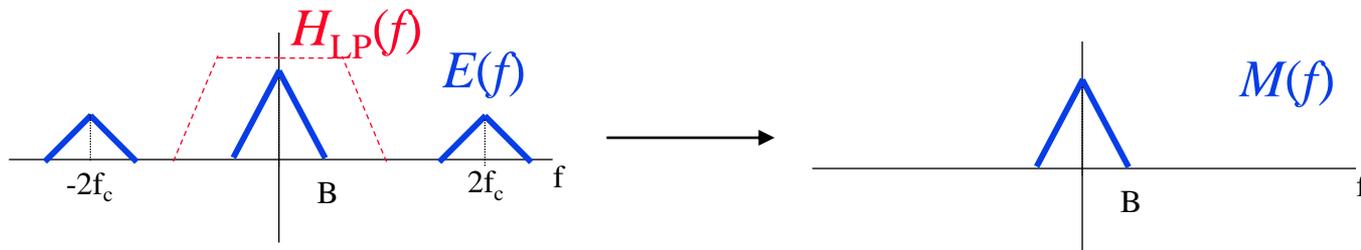
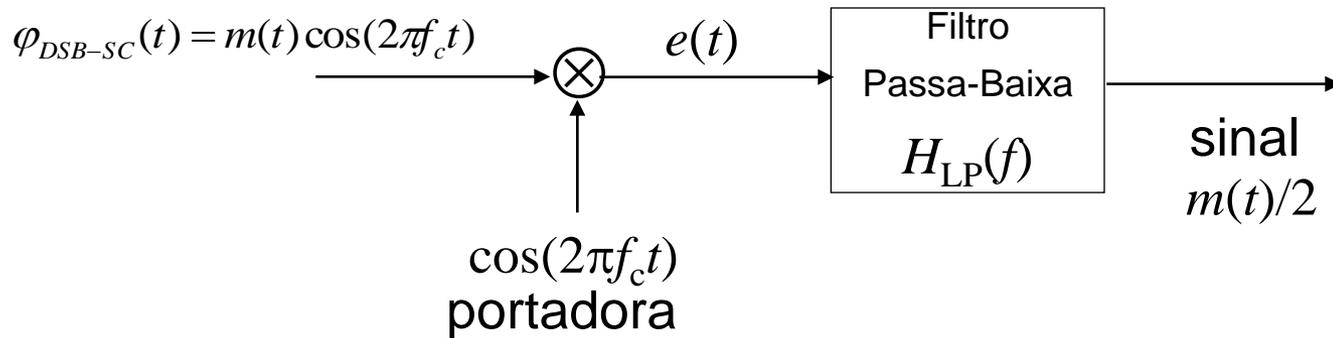
Modulação AM DSB-SC

$$m(t) \Leftrightarrow M(f)$$

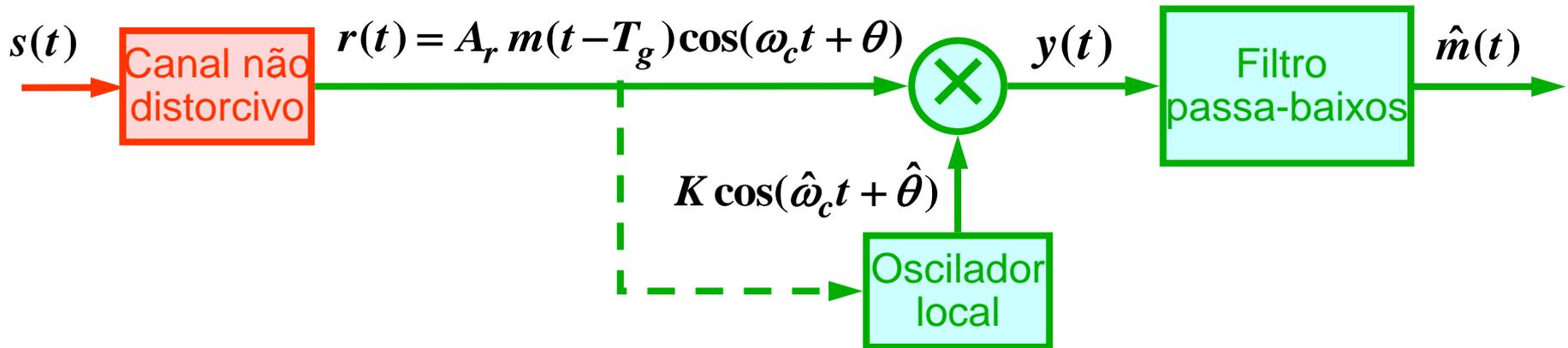
$$\Phi_{DSB-SC}(f) \Leftrightarrow \frac{1}{2}[M(f + f_c) + M(f - f_c)]$$



Demodulação



Demodulação de um sinal DSB-SC



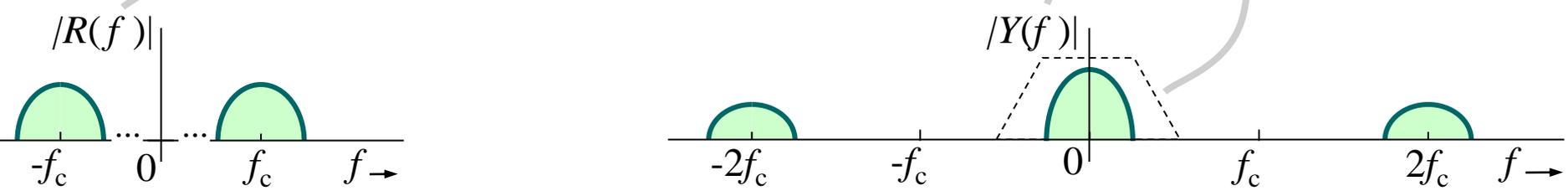
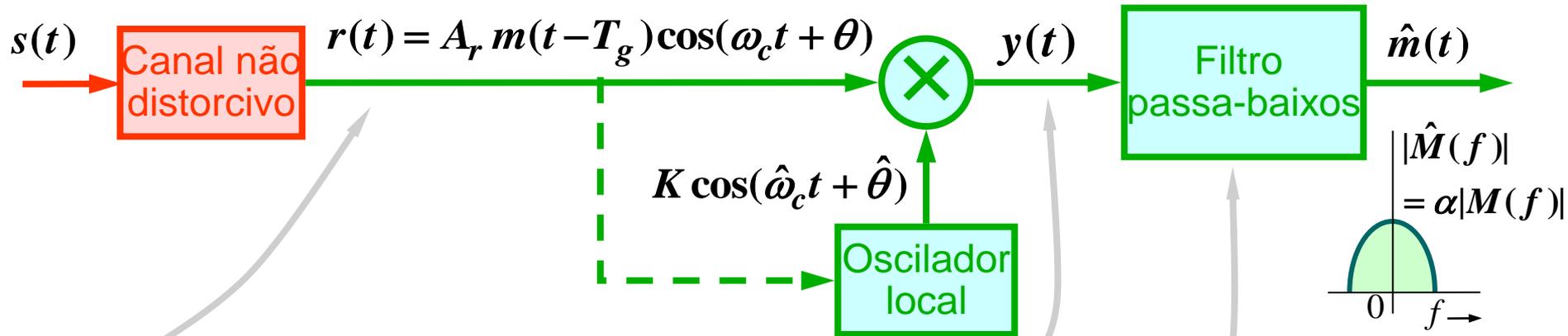
$$y(t) = A_r m(t - T_g) \cos(\omega_c t + \theta) K \cos(\hat{\omega}_c t + \hat{\theta})$$

↓ se $\hat{\omega}_c = \omega_c$ e $\hat{\theta} = \theta$

$$y(t) = A_r K m(t - T_g) \cos^2(\omega_c t + \theta)$$

$$= \underbrace{\frac{A_r K}{2} m(t - T_g)}_{\hat{m}(t)} + \underbrace{\frac{A_r K}{2} m(t - T_g) \cos(2\omega_c t + 2\theta)}_{\text{Esse componente é eliminado pelo filtro PB}}$$

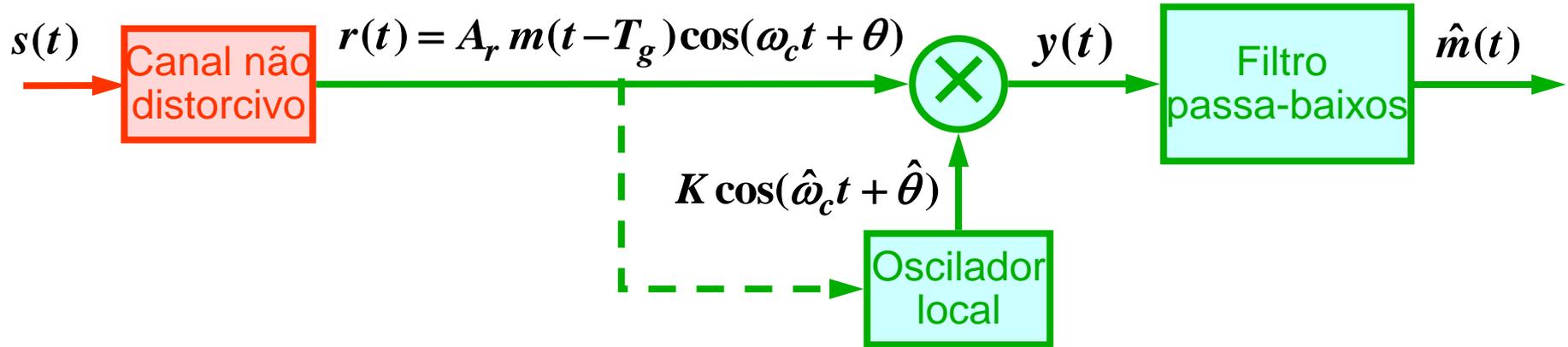
Demodulação de um sinal DSB-SC – domínio da frequência



$$y(t) = \frac{A_r K}{2} m(t - T_g) + \frac{A_r K}{2} m(t - T_g) \cos(2\omega_c t + 2\theta)$$

$$Y(f) = \frac{AK}{2} M(f) e^{-j2\pi f T_g} + \frac{AK}{4} \left[M(f - 2f_c) e^{-j[2\pi(f - 2f_c)T_g - 2\theta]} + M(f + 2f_c) e^{-j[2\pi(f + 2f_c)T_g + 2\theta]} \right]$$

Demodulação síncrona ou coerente

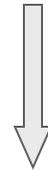


Esse esquema de recuperação do sinal de banda básica (sinal de informação) é denominado **demodulação ou detecção síncrona (ou coerente)**. O sinal recebido é multiplicado por um sinal cossenoidal gerado localmente, que deve ter idealmente a mesma frequência e fase da portadora do sinal modulado recebido.

Portanto, o receptor precisa gerar uma portadora local sincronizada (ou coerente) em frequência e fase com aquela usada pelo modulador no transmissor.

Demodulação com portadora local não sincronizada

$$y(t) = A_r m(t - T_g) \cos(\omega_c t + \theta) K \cos(\hat{\omega}_c t + \hat{\theta})$$



Se $\hat{\omega}_c = \omega_c + \Delta\omega$ e $\hat{\theta} = \theta + \theta_e$

$$y(t) = \frac{A_r K}{2} m(t - T_g) \cos(\Delta\omega t + \theta_e) + \underbrace{\frac{A_r K}{2} m(t - T_g) \cos[(2\omega_c + \Delta\omega)t + 2\theta + \theta_e]}_{\text{Componente eliminado pelo filtro PB}}$$

Componente eliminado pelo filtro PB

$$\hat{m}(t) = \frac{A_r K}{2} m(t - T_g) \underbrace{\cos(\Delta\omega t + \theta_e)}_{\text{Distorção}}$$

$\hat{m}(t)$ é uma versão distorcida de $m(t)$

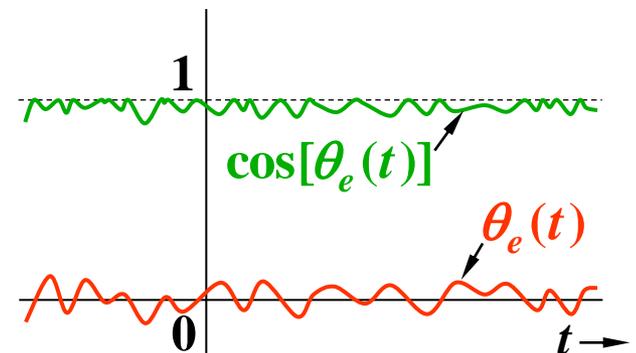
Demodulação síncrona com erro de fase na portadora local

Se $\hat{\omega}_c = \omega_c$, mas $\hat{\theta} = \theta + \theta_e$, então

$$\hat{m}(t) = \frac{A_r K}{2} m(t - T_g) \cos(\theta_e) \quad \theta_e = \hat{\theta} - \theta$$

\therefore , se θ_e é constante (não varia com o tempo), o erro de fase causa apenas a atenuação do $\hat{m}(t)$ recuperado

Em um sistema DSB-SC prático, o erro de fase θ_e varia aleatoriamente com o tempo, devido às imperfeições do circuito gerador da portadora local e a alterações no canal. Assim, $\hat{m}(t)$ é uma versão distorcida de $m(t)$. Contudo, essa distorção será pequena se as variações de θ_e forem pequenas. Os sistemas DSB-SC usam geralmente um esquema para gerar a portadora local que é capaz de manter $|\theta_e| \ll 1$ e, conseqüentemente, $\cos(\theta_e) \cong 1$.



Demodulação síncrona com erro de freqüência na portadora local

Se $\hat{\theta} = \theta$, mas $\hat{\omega}_c = \omega_c + \Delta\omega$, então

$$\hat{m}(t) = \frac{A_r K}{2} m(t - T_g) \cos(\Delta\omega t) \quad \Delta\omega = \hat{\omega}_c - \omega_c$$

Na prática, $\Delta\omega$ é usualmente pequeno. Assim $\hat{m}(t)$ saída $m(t)$ é a entrada $m(t)$ multiplicada por uma cossenóide de baixa freqüência. Isso faz com que a amplitude do sinal desejado $m(t)$ varie entre um máximo e zero periodicamente. Esse efeito é catastrófico mesmo para uma pequena diferença de freqüência.

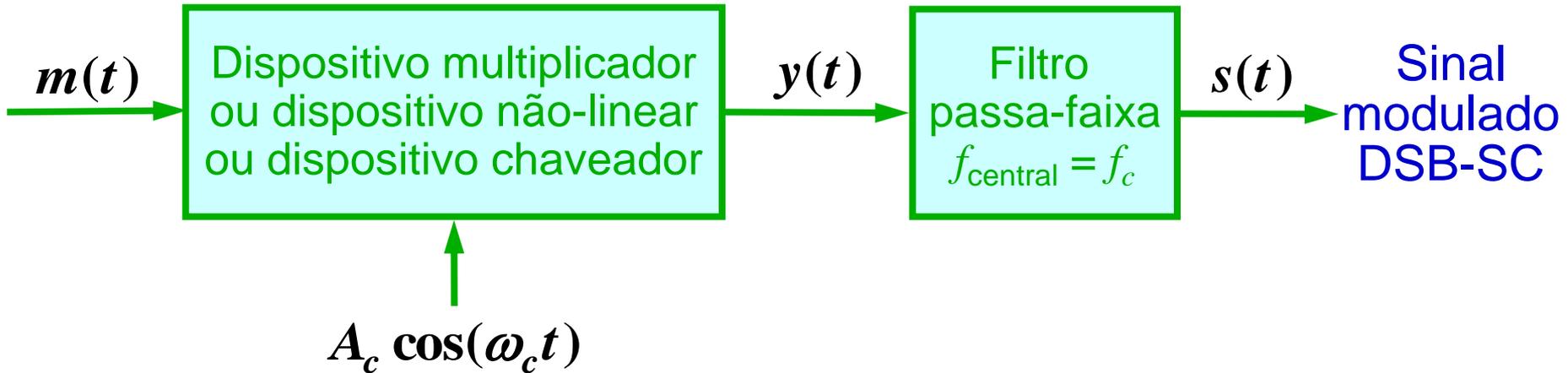
Portanto, o gerador de portadora do receptor deve ser mantido sincronizado, na fase e especialmente na freqüência, com a portadora do sinal DSB-SC recebido.

Esquemas para geração de portadora sincronizada nos receptores

- Uso de osciladores a cristal de quartzo no transmissor e no receptor, com cristais idênticos (mesmas dimensões). Essa é uma solução viável apenas para baixas frequências e transmissão ponto-a-ponto.
- Transmissão de um piloto juntamente com o sinal DSB-SC. O piloto é uma portadora de baixo nível ou uma versão da portadora com a frequência reduzida (ou aumentada) por um divisor (ou multiplicador) de frequência. No receptor, o piloto é separado do sinal DSB-SC, amplificado e usado como portadora local.
- Uso de um circuito recuperador de portadora: um circuito capaz de recuperar a portadora a partir do próprio sinal DSB-SC recebido.



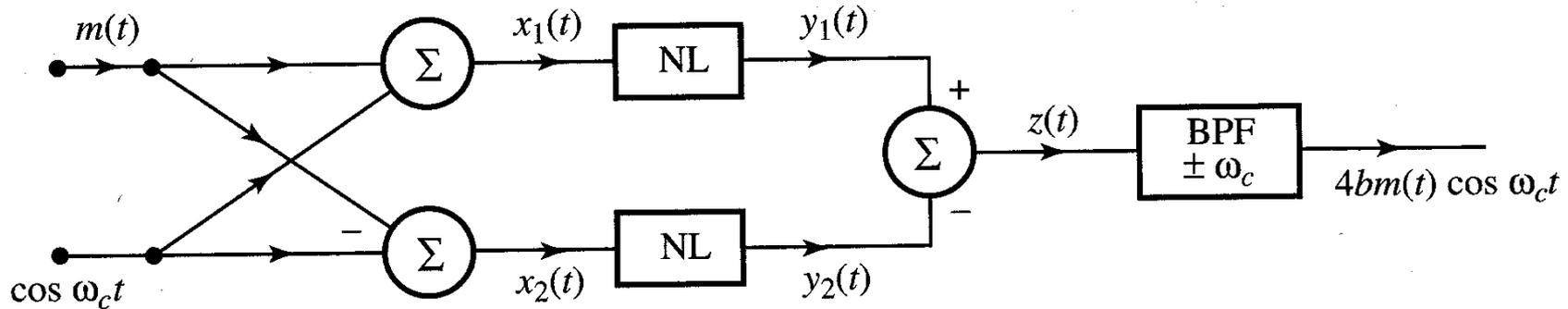
Construção de moduladores DSB-SC



Modulador unibalancedo: uma réplica da entrada $m(t)$ aparece na saída do dispositivo, $y(t)$, junto com o sinal modulado $K m(t) \cos(\omega_c t)$ — o filtro passa-faixa elimina a réplica de $m(t)$.

Modulador (bi-)balanceado: nenhuma das duas entradas, $m(t)$ e $A_c \cos(\omega_c t)$, aparece na saída do dispositivo, $y(t)$.

Modulador DSB-SC não-linear



$$y(t) = ax(t) + bx^2(t)$$

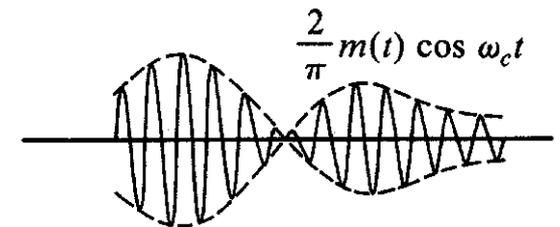
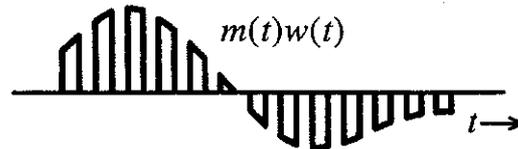
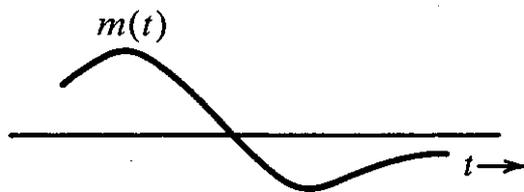
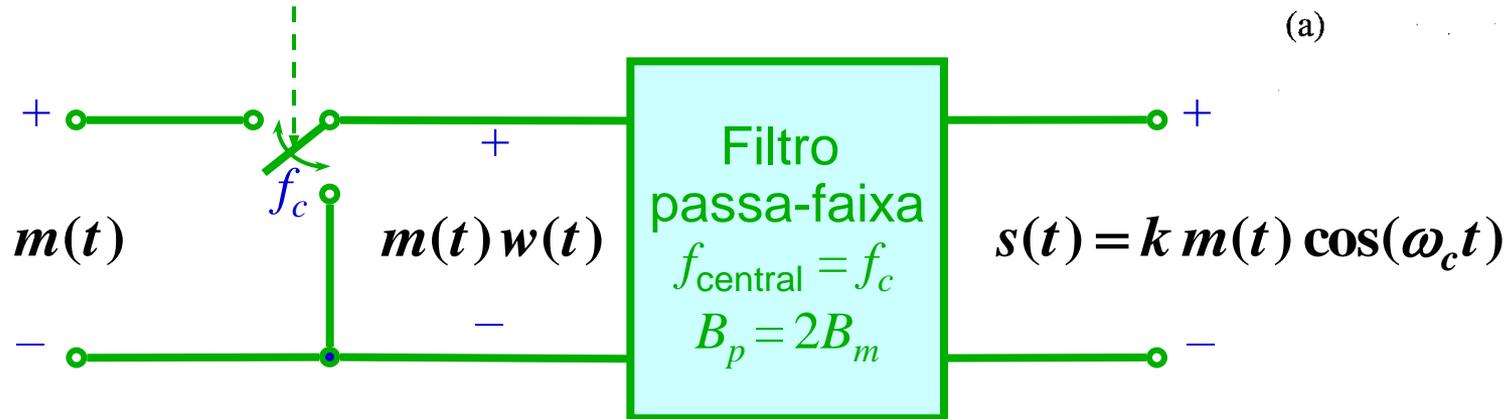
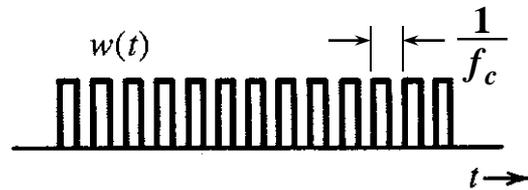
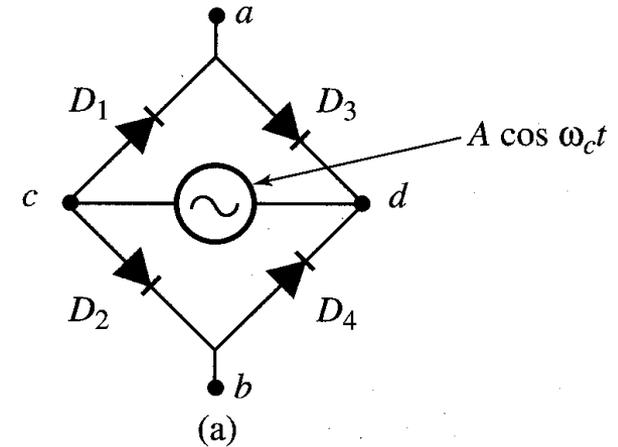
$$x_1(t) = \cos(\omega_c t) + m(t)$$

$$x_2(t) = \cos(\omega_c t) - m(t)$$

$$z(t) = y_1(t) - y_2(t) = [ax_1(t) + bx_1^2(t)] - [ax_2(t) + bx_2^2(t)]$$

$$z(t) = 2am(t) + 4bm(t) \cos \omega_c t$$

Modulador DSB-SC do tipo chaveado

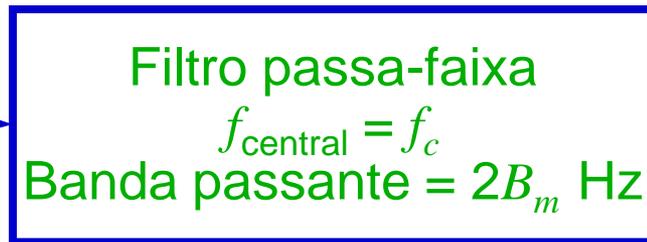


Modulador DSB-SC do tipo chaveado

$$w(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left[\cos(\omega_c t) - \frac{1}{3} \cos(3\omega_c t) + \frac{1}{5} \cos(5\omega_c t) - \dots \right]$$

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

$$+ \frac{2}{\pi} \left[m(t)\cos(\omega_c t) - \frac{1}{3}m(t)\cos(3\omega_c t) + \frac{1}{5}m(t)\cos(5\omega_c t) - \dots \right]$$

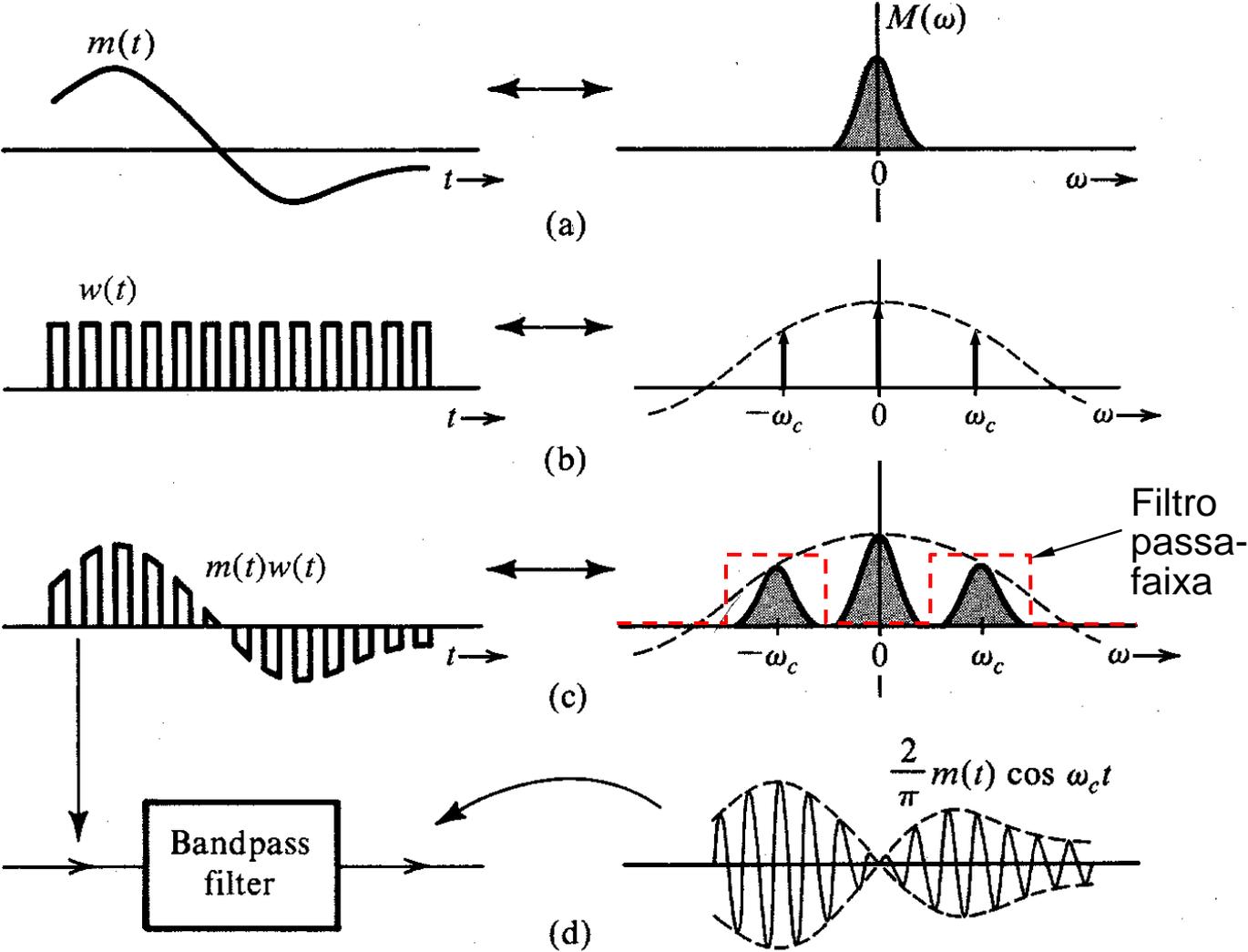


$$s(t) = \frac{2}{\pi} m(t) \cos(\omega_c t)$$

$$W(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_n \delta(f - nf_c) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} \text{sinc}\left(\frac{n}{2}\right) \delta(f - nf_c)$$

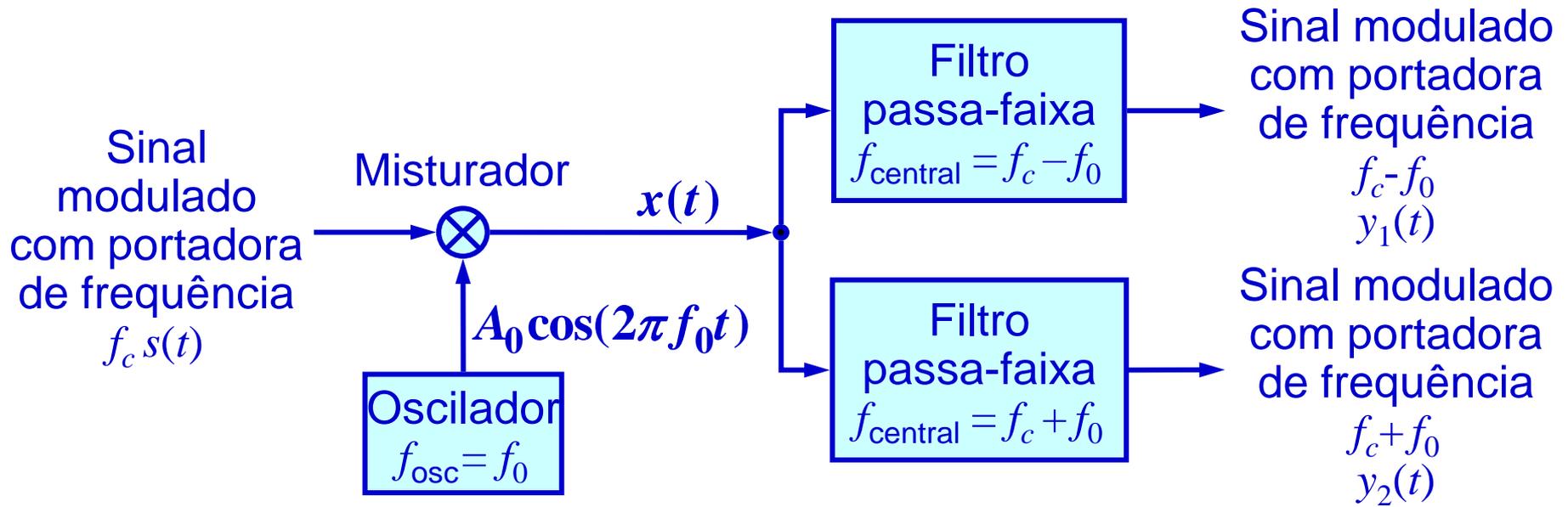
$$\mathbf{F} [m(t)w(t)] = M(f) * W(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} \text{sinc}\left(\frac{n}{2}\right) M(f - nf_c)$$

Modulador DSB-SC do tipo chaveado



CONVERSÃO DE FREQUÊNCIA

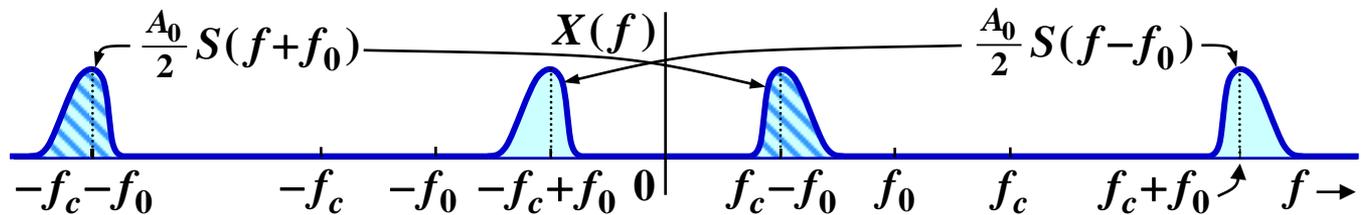
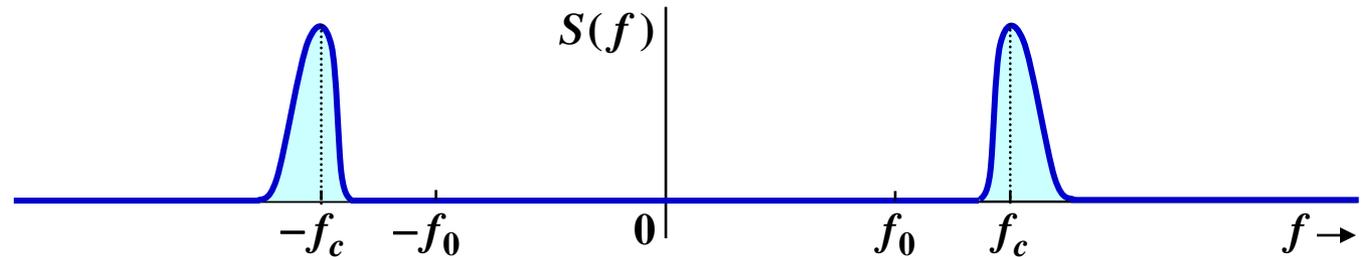
Conversão de frequência



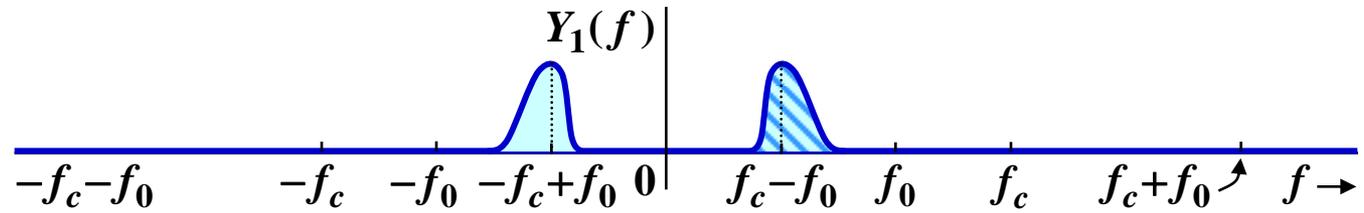
$$x(t) = s(t)A_0 \cos(2\pi f_0 t) \Leftrightarrow X(f) = \frac{A_0}{2} [S(f-f_0) + S(f+f_0)]$$

Conversão de frequência com $f_0 < f_c$

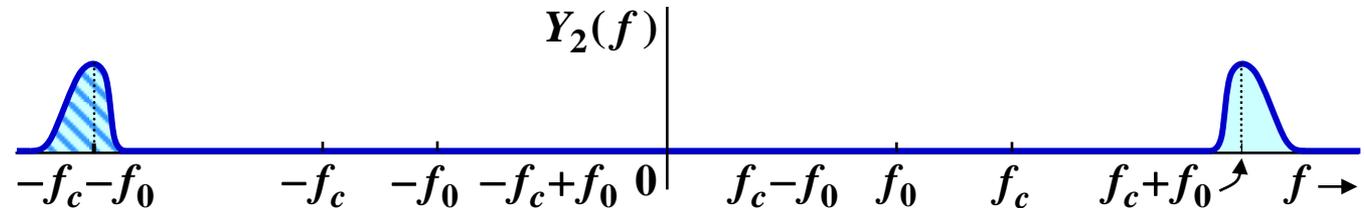
$$x(t) = A_0 s(t) \cos(2\pi f_0 t) \Leftrightarrow X(f) = \frac{A_0}{2} [S(f-f_0) + S(f+f_0)]$$



Conversão
abaixadora
(down-conversion)

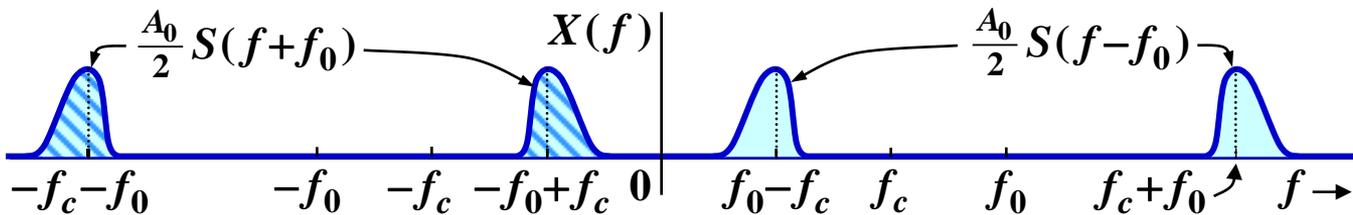
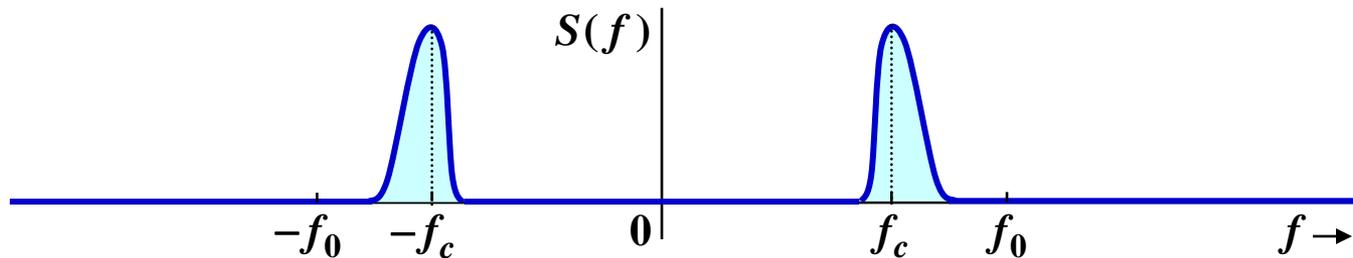


Conversão
elevadora
(up-conversion)

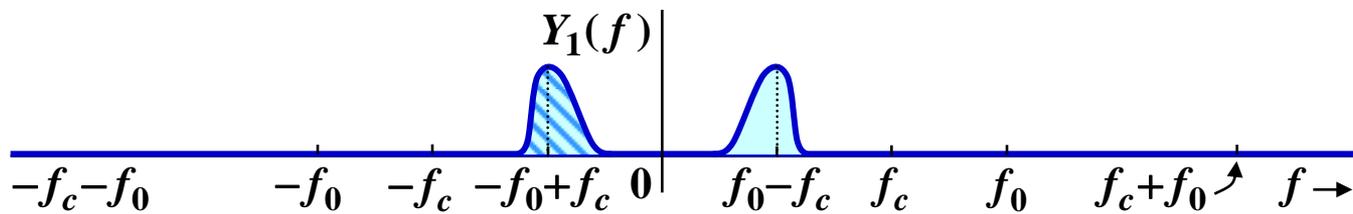


Conversão de frequência com $f_0 > f_c$

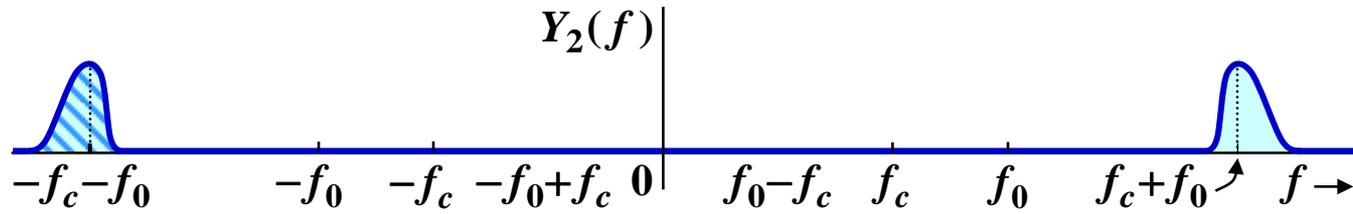
$$x(t) = A_0 s(t) \cos(2\pi f_0 t) \Leftrightarrow X(f) = \frac{A_0}{2} [S(f-f_0) + S(f+f_0)]$$



Conversão
abaixadora
(down-conversion)



Conversão
elevadora
(up-conversion)



Conversores de frequência: análise no domínio do tempo

$$s(t) = a(t) \cos[\omega_c t + \theta(t)] \Rightarrow x(t) = s(t) A_0 \cos(\omega_0 t)$$

Se $f_c > f_0$:

$$= A_0 a(t) \cos[\omega_c t + \theta(t)] \cos(\omega_0 t)$$

$$x(t) = \frac{A_0}{2} a(t) \cos[(\omega_c - \omega_0)t + \theta(t)] + \frac{A_0}{2} a(t) \cos[(\omega_c + \omega_0)t + \theta(t)]$$

Sinal modulado com frequência-portadora de $f_i = f_c - f_0$ Hz

Sinal modulado com frequência-portadora de $f_s = f_c + f_0$ Hz

Se $f_c < f_0$:

Note a mudança de sinal

$$x(t) = \frac{A_0}{2} a(t) \cos[(\omega_0 - \omega_c)t - \theta(t)] + \frac{A_0}{2} a(t) \cos[(\omega_0 + \omega_c)t + \theta(t)]$$

Sinal modulado com frequência-portadora de $f_i = f_0 - f_c$ Hz

Sinal modulado com frequência-portadora de $f_s = f_c + f_0$ Hz