

Modulação em Amplitude

Edmar José do Nascimento
(Princípios de Comunicações)

Universidade Federal do Vale do São Francisco

Roteiro

- 1 Modulação AM DSB-SC
- 2 Modulação AM Tradicional
- 3 Modulação QAM
- 4 Modulação SSB
- 5 Modulação VSB
- 6 Extras

Introdução

- Um sinal proveniente de uma fonte de informação ou de um transdutor é chamado de sinal em **banda base**
- Os sinais em banda base podem ser transmitidos através de cabos ou fibras ópticas
- Por outro lado, esse tipo de sinal não é adequado para transmissão através de um enlace de rádio
 - Frequências mais altas são necessárias para garantir maior eficiência na propagação
 - Antenas menores podem ser utilizadas aumentando-se a frequência
- A comunicação em que o espectro em banda base é deslocado para frequências maiores é conhecida como **comunicação com portadora**

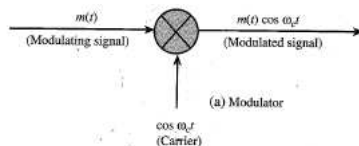
Introdução

- Na comunicação com portadora, um sinal senoidal tem a sua amplitude, fase ou frequência modificada pelo sinal em banda base $m(t)$
- Para os sinais em banda base analógicos, as modulações principais são:
 - Modulação em Amplitude (AM, AM-DSB-SC, AM-SSB-SC, QAM e AM-VSB)
 - Modulação em Ângulo (FM e PM)
- Para os sinais digitais, há uma infinidade de tipos de modulação
 - ASK, FSK, PSK, DPSK, GMSK, OOSK, etc.

Modulação AM-DSB-SC

- Seja $m(t)$ um sinal em banda base com largura de banda igual a B Hz e $c(t) = \cos \omega_c t$ uma portadora senoidal
- Na modulação em amplitude com banda lateral dupla e portadora suprimida (AM-DSB-SC), o sinal modulado é dado por

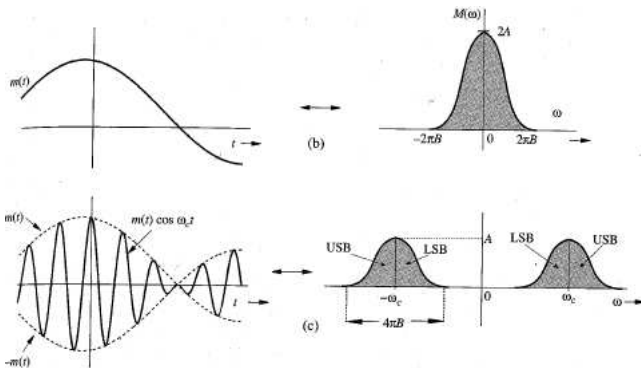
$$s(t) = m(t)c(t) = m(t) \cos \omega_c t$$



Modulação AM-DSB-SC

- Se $m(t) \Longleftrightarrow M(\omega)$, então

$$m(t) \cos \omega_c t \Longleftrightarrow \frac{1}{2}[M(\omega + \omega_c) + M(\omega - \omega_c)]$$



Espectro da Modulação AM-DSB-SC

- Sendo $m(t)$ um sinal real, o espectro de amplitude $|M(\omega)|$ é uma função par
- Quando o sinal é modulado, a sua largura de banda passa a ser de $2B$ Hz
- A parte superior do espectro (frequências acima de ω_c) possui a mesma informação que a parte inferior do espectro (frequências abaixo de ω_c)
 - Banda lateral superior (Upper SideBand - USB) -
 $\omega_c < |\omega| < (\omega_c + 2\pi B)$
 - Banda lateral inferior (Lower SideBand - LSB) -
 $(\omega_c - 2\pi B) < |\omega| < \omega_c$
- Observa-se que o sinal da portadora não aparece no espectro do sinal modulado (impulso em $\pm\omega_c$)

Demodulação de um sinal AM-DSB-SC

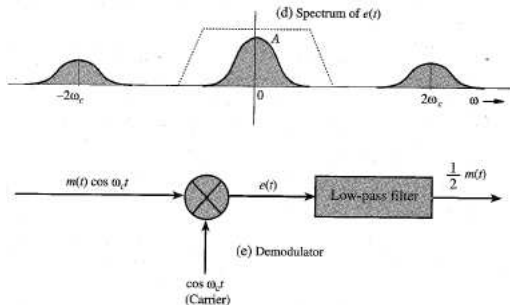
- O processo de recuperação do sinal em banda base é chamado de **demodulação**
- Na demodulação, o espectro é transladado de volta para a origem e as componentes indesejadas são eliminadas por filtragem
- Seja $s(t)$ o sinal modulado, então:

$$\begin{aligned} e(t) &= s(t) \cos \omega_c t = m(t) \cos^2 \omega_c t \\ &= \frac{1}{2} [m(t) + m(t) \cos 2\omega_c t] \end{aligned}$$

$$E(\omega) \iff \frac{1}{2} M(\omega) + \frac{1}{4} [M(\omega + 2\omega_c) + M(\omega - 2\omega_c)]$$

Demodulação de um sinal AM-DSB-SC

- Passando o sinal $e(t)$ através de um filtro passa-baixas, o sinal $1/2m(t)$ é recuperado
- Este processo é conhecido como demodulação síncrona ou coerente
 - É necessário na demodulação uma senóide com a mesma fase e frequência usada na modulação

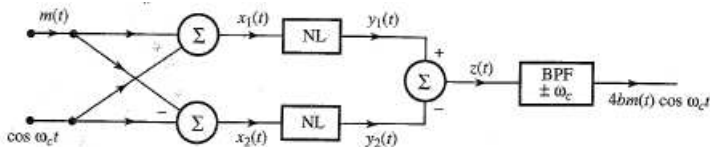


Moduladores

- A modulação pode ser obtida de diversas maneiras
 - Multiplicadores analógicos
 - Moduladores não lineares
 - Moduladores chaveados
- Multiplicadores analógicos
 - $m(t)$ e $\cos \omega_c t$ são multiplicados usando um multiplicador analógico
 - Saída é proporcional ao produto das duas entradas (amplificador de ganho variável)
 - Esse tipo de modulador é relativamente caro de ser construído

Moduladores não Lineares

- Um modulador em amplitude pode ser obtido empregando-se elementos não lineares (diodos ou transistores)
 - No circuito abaixo, a ação do elemento não linear é representada por $y(t) = ax(t) + bx^2(t)$
 - A saída do somador é dada por $z(t) = 2am(t) + 4bm(t) \cos \omega_c t$
 - O sinal modulado é obtido passando-se $z(t)$ por um filtro passa-faixas centrado em ω_c



Moduladores Chaveados

- A modulação pode ser obtida a partir da multiplicação do sinal $m(t)$ por uma onda periódica qualquer
- Uma onda periódica pode ser representada em séries de Fourier por

$$\phi(t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cos(n\omega_c t + \theta_n)$$

- Logo,

$$m(t)\phi(t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n m(t) \cos(n\omega_c t + \theta_n)$$

Moduladores Chaveados

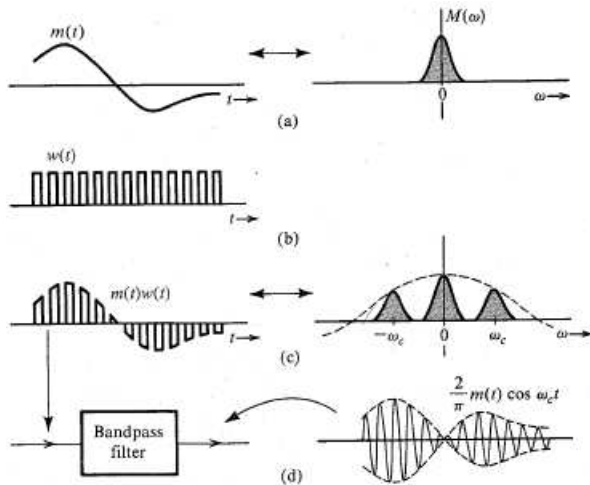
- Para uma onda quadrada, por exemplo, a decomposição em séries de Fourier resulta em

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

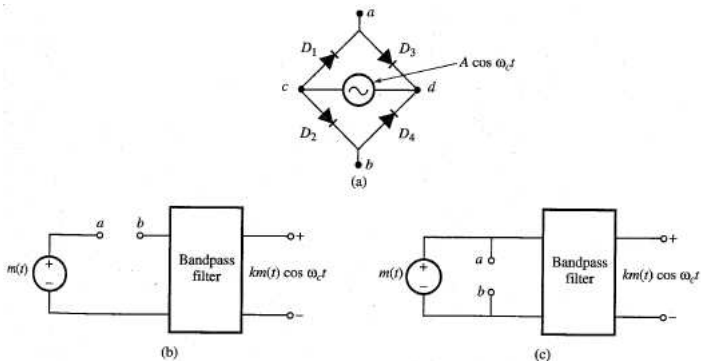
- Logo,

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

Moduladores Chaveados



Moduladores Chaveados



- (a) Modulador em ponte de diodos em configurações série e paralelo.

Moduladores Chaveados

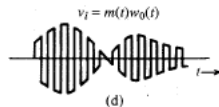
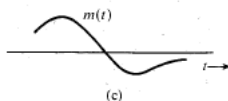
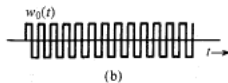
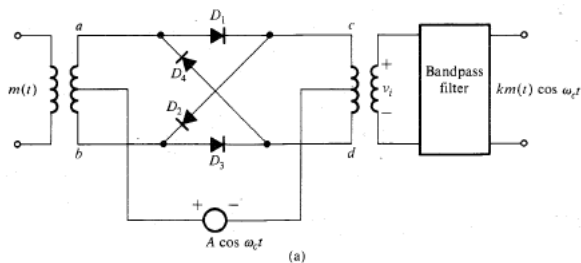
- Uma outra opção de modulador chaveado é o modulador em anel (nível DC nulo)
- Nesse caso,

$$\phi(t) = \frac{4}{\pi} \left(\cos \omega_c t - \frac{1}{3} \cos 3\omega_c t + \frac{1}{5} \cos 5\omega_c t + \dots \right)$$

- Logo,

$$m(t)\phi(t) = \frac{4}{\pi} \left(m(t) \cos \omega_c t - \frac{1}{3} m(t) \cos 3\omega_c t + \dots \right)$$

Moduladores em Anel



Demodulação AM-DSB-SC

- A demodulação de sinais modulados em AM-DSB-SC é um processo idêntico à modulação
 - Em ambos os processos, a entrada é multiplicada pela portadora senoidal e depois filtrada
- A diferença está apenas no filtro utilizado
 - Na modulação se utiliza um filtro passa-faixa centrado em ω_c
 - Na demodulação se utiliza um filtro passa-baixas

Modulação em Amplitude (AM)

- Na demodulação de um sinal AM-DSB-SC, é necessário gerar uma portadora na recepção com a mesma frequência e fase usadas na modulação
 - Demodulação síncrona
- Na prática, isso exige que o transmissor possua circuitos de recuperação da portadora (PLL), tornando a sua construção mais complexa
- Em algumas situações, é de interesse que os receptores sejam mais simples e conseqüentemente mais baratos
 - Comunicação por difusão (*broadcast*)

Modulação em Amplitude (AM)

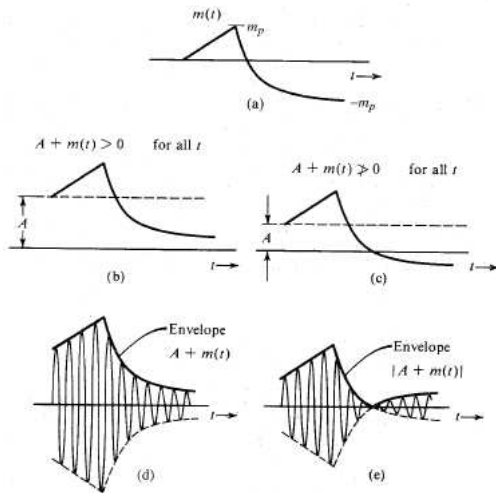
- Uma alternativa é enviar o sinal da portadora junto com o sinal modulado
 - Receptor mais simples
 - O transmissor precisa gastar mais potência na transmissão
- Na modulação em Amplitude tradicional, o sinal modulado é dado por:

$$\varphi_{AM}(t) = A \cos \omega_c t + m(t) \cos \omega_c t = (A + m(t)) \cos \omega_c t$$

- O espectro do sinal modulado é dado por:

$$\begin{aligned} \varphi_{AM}(t) \iff \frac{1}{2} [M(\omega + \omega_c) + M(\omega - \omega_c)] \\ + \pi A [\delta(\omega + \omega_c) + \delta(\omega - \omega_c)] \end{aligned}$$

Modulação em Amplitude (AM)



Modulação em Amplitude (AM)

- Para que seja possível realizar a demodulação através da detecção de envelope, é necessário que:
 - $f_c \gg$ largura de banda de $m(t)$
 - $A + m(t) \geq 0$ para todo t
- Se $m(t)$ assume valores na faixa $(-m_p, m_p)$, então

$$A \geq m_p$$

- Definindo-se o **índice de modulação AM** μ como

$$\mu = \frac{m_p}{A}$$

Modulação em Amplitude (AM)

- Então a condição seguinte assegura que o sinal possa ser demodulado por detecção de envelope

$$0 \leq \mu \leq 1$$

- Quando $m_{min} \neq -m_{max}$, então μ é definido como

$$\mu = \frac{m_{max} - m_{min}}{2A + m_{max} + m_{min}}$$

Modulação em Amplitude (AM)

- Quando $\mu > 1$, então o sinal AM não pode ser demodulado por detecção de envelope
 - Essa condição é chamada de sobremodulação
 - Nesse caso, só é possível realizar a demodulação síncrona
- Para todos os casos é possível realizar a demodulação síncrona

Eficiência da Modulação AM

- O sinal AM é composto de dois elementos
 - A portadora - $A \cos \omega_c t$
 - As bandas laterais - $m(t) \cos \omega_c t$
- A potência do termo da portadora (P_c) e do termo das bandas laterais (P_s) são dadas por

$$P_c = \frac{A^2}{2}; \quad P_s = \frac{1}{2}P_m$$

- A eficiência da modulação AM é dada por

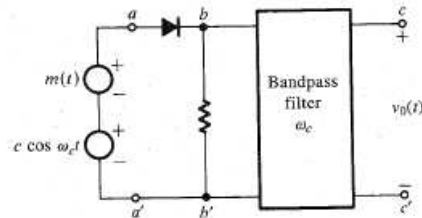
$$\eta = \frac{P_{Util}}{P_{Total}} = \frac{P_s}{P_c + P_s} = \frac{P_m}{A^2 + P_m} 100\%$$

Eficiência da Modulação AM

- A eficiência máxima é obtida para $\mu = 1$
- Para os sinais empregados na prática, a eficiência é da ordem de 25%

Geração de Sinais AM

- Os circuitos usados para modulação DSB-SC podem ser usados para a geração de sinais AM se a entrada for $A + m(t)$
- O circuito abaixo pode ser usado para gerar sinais AM



Geração de Sinais AM

- No circuito anterior, a tensão ao longo dos terminais bb' é

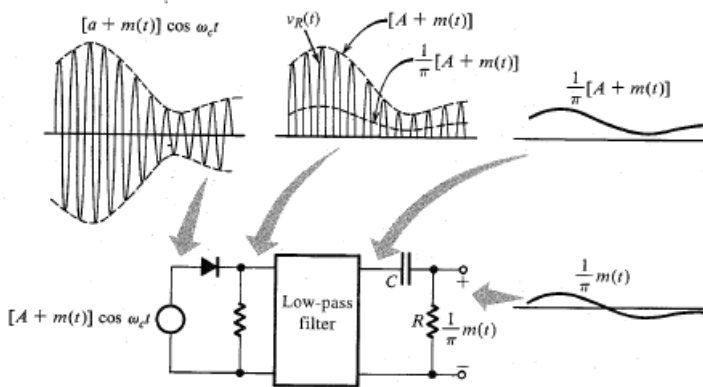
$$\begin{aligned}v_{bb'} &= [c \cos \omega_c t + m(t)]w(t) \\&= [c \cos \omega_c t + m(t)] \left\{ \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left(\cos \omega_c t - \frac{1}{3} \cos \omega_c t + \dots \right) \right\} \\&= \underbrace{\frac{c}{2} \cos \omega_c t + \frac{2}{\pi} m(t) \cos \omega_c t}_{AM} + \text{Termos extras}\end{aligned}$$

Demodulação de Sinais AM

- A demodulação de sinais AM pode ser feita através dos seguintes métodos
 - Detector retificador
 - Detector de envelope
 - Demodulação síncrona (pouco usada)
- No detector retificador, um sinal AM é aplicado em um diodo e um resistor em série, resultando em

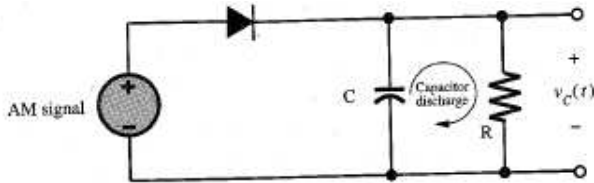
$$\begin{aligned}v_R &= \{[A + m(t)] \cos \omega_c t\} w(t) \\&= [A + m(t)] \cos \omega_c t \left\{ \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left(\cos \omega_c t - \frac{1}{3} \cos 3\omega_c t + \dots \right) \right\} \\&= \frac{1}{\pi} [A + m(t)] + \text{Termos extras}\end{aligned}$$

Detector Retificador



Detector de Envelope

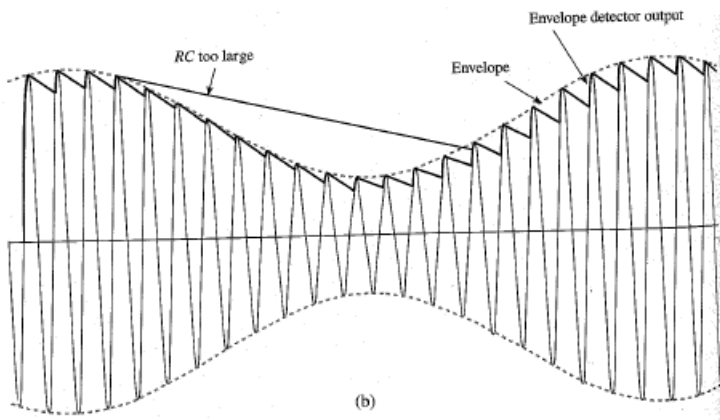
- No detector de envelope, o capacitor é carregado durante o ciclo positivo e descarrega quando o diodo é cortado



- Para reduzir as ondulações, é necessário que $RC \gg 1/\omega_c$
- Entretanto, se RC for muito grande, a tensão no capacitor pode não seguir o envelope

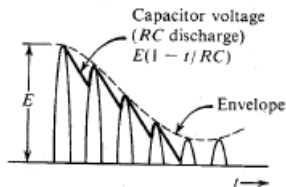
$$1/\omega_c \ll RC < 1/(2\pi B) \text{ ou } 2\pi B < 1/(RC) \ll \omega_c$$

Detector de Envelope



Detector de Envelope

- Quando $m(t) = \cos \omega_m t$, o envelope é dado por $E(t) = A[1 + \mu \cos \omega_m t]$ e então se pode calcular um limite para a constante RC



$$v_c = Ee^{-t/RC} \simeq E\left(1 - \frac{t}{RC}\right)$$

$$\left|\frac{dv_c}{dt}\right| = \frac{E}{RC} \geq \left|\frac{dE(t)}{dt}\right|$$

$$RC \geq \frac{1}{\omega_m} \left(\frac{\sqrt{1 - \mu^2}}{\mu} \right)$$

Modulação em Quadratura

- Na modulação em quadratura, são modulados dois sinais na mesma banda

$$\varphi_{QAM}(t) = m_1(t) \cos \omega_c t + m_2(t) \sin \omega_c t$$

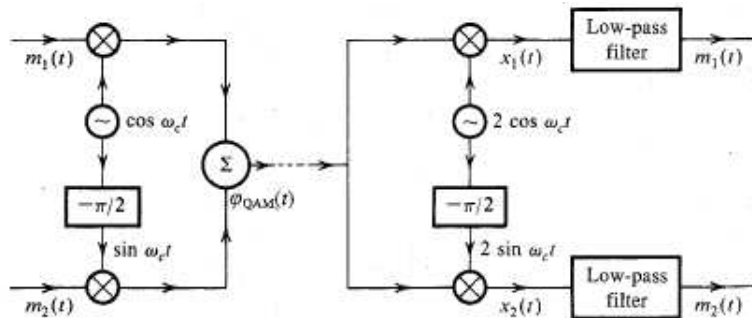
- Na demodulação, os dois sinais são separados usando detecção síncrona

$$x_1(t) = \varphi_{QAM}(t).2 \cos \omega_c t \rightarrow \text{FPB} \rightarrow m_1(t)$$

$$x_2(t) = \varphi_{QAM}(t).2 \sin \omega_c t \rightarrow \text{FPB} \rightarrow m_2(t)$$

- Em QAM, um pequeno erro de fase na portadora de demodulação resulta em interferência entre os canais

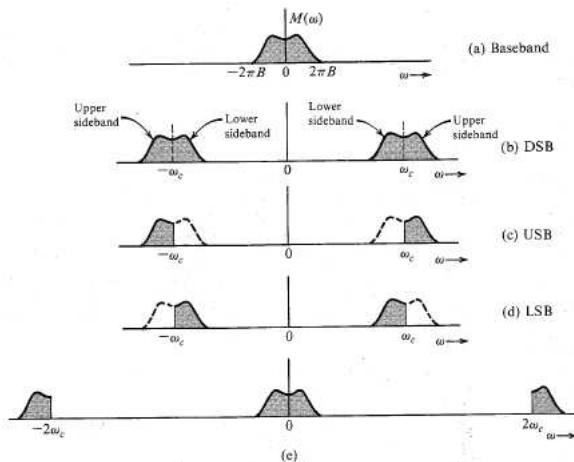
Modulação em Quadratura



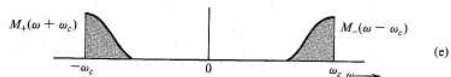
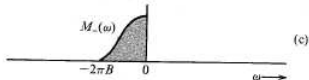
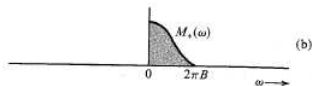
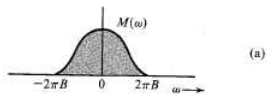
Modulação AM com Banda Lateral Única

- Até agora, o espectro das modulações estudadas ocupam uma banda de $2B$ Hertz para um sinal em banda base com banda igual a B
- Como a mesma informação está presente em ambas as bandas laterais, é possível usar apenas uma dessas bandas na transmissão
- O sinal resultante pode ser demodulado através de métodos de demodulação síncrona

Modulação AM com Banda Lateral Única



Representação de Sinais SSB-SC



Representação de Sinais SSB-SC

- As BLS e BLI podem ser representadas respectivamente por:

$$M_+(\omega) = M(\omega)u(\omega)$$

$$M_-(\omega) = M(\omega)u(-\omega)$$

- As respectivas representações no domínio do tempo, $m_+(t)$ e $m_-(t)$, são funções complexas
- Além disso, $M_+(-\omega)$ e $M_-(\omega)$ são conjugados, o que resulta que $m_+(t)$ e $m_-(t)$ são também conjugados
- Como $m_+(t) + m_-(t) = m(t)$, tem-se que:

$$m_+(t) = \frac{1}{2}[m(t) + jm_h(t)]$$

$$m_-(t) = \frac{1}{2}[m(t) - jm_h(t)]$$

Representação de Sinais SSB-SC

- A parcela desconhecida $m_h(t)$ pode ser obtida da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}M_+(\omega) &= M(\omega)u(\omega) \\&= \frac{1}{2}M(\omega)[1 + \operatorname{sgn}(\omega)] \\&= \frac{1}{2}M(\omega) + \frac{1}{2}M(\omega)\operatorname{sgn}(\omega)\end{aligned}$$

- Comparando-se as expressões de $m_+(t)$ e $M_+(\omega)$, tem-se que $jm_h(t) \iff M(\omega)\operatorname{sgn}(\omega)$, logo:

$$M_h(\omega) = -jM(\omega)\operatorname{sgn}(\omega)$$

Representação de Sinais SSB-SC

- Da tabela de transformadas, tem-se que:

$$\frac{1}{\pi t} \iff -j \operatorname{sgn}(\omega)$$

- Assim, $m_h(t) = m(t) * 1/\pi t$, o que resulta em:

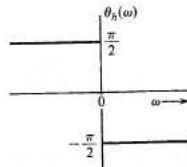
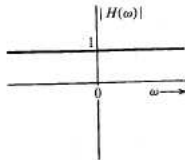
$$m_h(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{m(\tau)}{t - \tau} d\tau$$

- Esta expressão é conhecida como a **Transformada de Hilbert** de $m(t)$

Representação de Sinais SSB-SC

- A transformada de Hilbert pode ser interpretada como sendo a saída de um filtro $h(t)$, $H(\omega)$ com entrada $m(t)$
- Sendo assim,

$$H(\omega) = -j\text{sgn}(\omega) = \begin{cases} -j = 1.e^{-j\pi/2} & \omega > 0 \\ j = 1.e^{j\pi/2} & \omega < 0 \end{cases}$$



Representação de Sinais SSB-SC

- A partir das expressões para $M_+(\omega)$ e $M_-(\omega)$, os sinais modulados com banda lateral única são dados por
 - Banda Lateral Superior

$$\begin{aligned}\Phi_{BLS}(\omega) &= M_+(\omega - \omega_c) + M_-(\omega + \omega_c) \\ &\iff \varphi_{BLS}(t) = m_+(t)e^{j\omega_c t} + m_-(t)e^{-j\omega_c t} \\ \varphi_{BLS}(t) &= m(t) \cos \omega_c t - m_h(t) \sin \omega_c t\end{aligned}$$

- Banda Lateral Inferior

$$\begin{aligned}\Phi_{BLI}(\omega) &= M_-(\omega - \omega_c) + M_+(\omega + \omega_c) \\ &\iff \varphi_{BLI}(t) = m_-(t)e^{j\omega_c t} + m_+(t)e^{-j\omega_c t} \\ \varphi_{BLI}(t) &= m(t) \cos \omega_c t + m_h(t) \sin \omega_c t\end{aligned}$$

Exemplo

Exemplo

Obter $\varphi_{BLS}(t)$ e $\varphi_{BLI}(t)$ para o sinal $m(t) = \cos \omega_m t$.

Resposta

$$\varphi_{BLS}(t) = \cos(\omega_c + \omega_m)t$$

$$\varphi_{BLI}(t) = \cos(\omega_c - \omega_m)t$$

Exemplo

Exemplo

Obter $\varphi_{BLS}(t)$ e $\varphi_{BLI}(t)$ para o sinal $m(t) = \cos \omega_m t$.

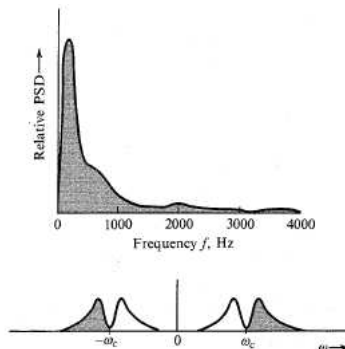
Resposta

$$\varphi_{BLS}(t) = \cos(\omega_c + \omega_m)t$$

$$\varphi_{BLI}(t) = \cos(\omega_c - \omega_m)t$$

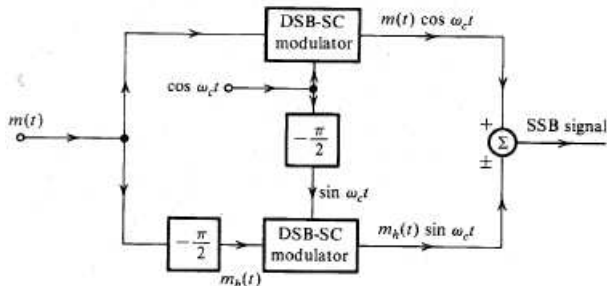
Geração de Sinais SSB-SC

- A geração de sinais SSB-SC pode ser feita de duas maneiras:
- Método de Filtragem Seletiva
 - O sinal DSB-SC é passado através de um filtro a fim de eliminar a banda indesejada



Geração de Sinais SSB-SC

- Método de Deslocamento de Fase
 - Todas as componentes do sinal são atrasadas em $\pi/2$ radianos
 - Isto equivale a realizar a transformada de Hilbert do Sinal
 - Um defasador desse tipo é irrealizável, de modo que só uma aproximação pode ser obtida



Demodulação de Sinais SSB-SC

- Para sinais SSB-SC, pode-se utilizar os métodos de demodulação síncrona
- Um sinal SSB-SC pode ser representado por

$$\varphi_{SSB}(t) = m(t) \cos \omega_c t \mp m_h(t) \sin \omega_c t$$

- Logo,

$$\varphi_{SSB}(t) \cos \omega_c t = \frac{1}{2}m(t) + \frac{1}{2}[m(t) \cos 2\omega_c t \mp m_h(t) \sin 2\omega_c t]$$

- Passando-se o sinal através de um filtro passa-baixas, obtém-se $m(t)$

Detecção de Envelope de Sinais SSB+C

- É possível inserir o sinal da portadora no sinal SSB, resultando em:

$$\begin{aligned}\varphi_{SSB+C}(t) &= A \cos \omega_c t + [m(t) \cos \omega_c t \mp m_h(t) \sin \omega_c t] \\ &= [A + m(t)] \cos \omega_c t \mp m_h(t) \sin \omega_c t \\ &= E(t) \cos (\omega_c t + \theta)\end{aligned}$$

- O envelope $E(t)$ é dado por

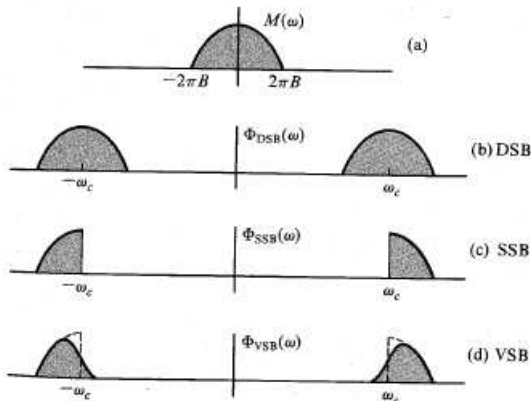
$$\begin{aligned}E(t) &= \{[A + m(t)]^2 + m_h^2(t)\}^{1/2} \\ &= A \left[1 + \frac{2m(t)}{A} + \frac{m^2(t)}{A^2} + \frac{m_h^2(t)}{A^2} \right]^{1/2} \\ &\simeq A \left[1 + \frac{2m(t)}{A} \right]^{1/2} \simeq A + m(t) \quad (A \gg |m(t)|)\end{aligned}$$

Modulação com Banda Lateral Vestigial

- A geração de sinais SSB é bastante difícil para a maioria dos sinais
 - Se o sinal não tiver um nível DC nulo, é necessário que o filtro seja ideal e portanto, irrealizável
- Por outro lado, a geração de sinais DSB é bastante simples, mas gasta o dobro da largura de banda dos sinais SSB
- A modulação com Banda Lateral Vestigial (*VSB - Vestigial Side Band*) representa um compromisso entre SSB e DSB
 - Sinais VSB são mais fáceis de gerar que sinais SSB
 - A largura de banda dos sinais VSB é maior que SSB, mas menor que DSB

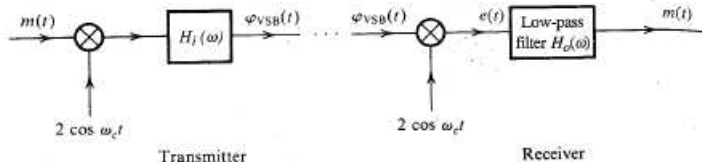
Modulação com Banda Lateral Vestigial

- Na modulação VSB, é realizado um corte gradual em uma das bandas laterais



Modulação com Banda Lateral Vestigial

- Na modulação VSB, são utilizados um *filtro formatador vestigial* $H_i(\omega)$ na transmissão e um *filtro equalizador* $H_o(\omega)$ na recepção



Modulação com Banda Lateral Vestigial

- O sinal VSB na saída do filtro de entrada é dado por:

$$\Phi_{VSB}(\omega) = [M(\omega + \omega_c) + M(\omega - \omega_c)]H_i(\omega)$$

- Na demodulação,

$$e(t) = 2\varphi_{VSB}(t) \cos \omega_c t \iff [\Phi_{VSB}(\omega + \omega_c) + \Phi_{VSB}(\omega - \omega_c)]$$

- Para que a saída seja $m(t)$, é necessário que:

$$\begin{aligned} M(\omega) &= E(\omega)H_o(\omega) = [\Phi_{VSB}(\omega + \omega_c) + \Phi_{VSB}(\omega - \omega_c)]H_o(\omega) \\ &= [M(\omega + 2\omega_c) + M(\omega)]H_i(\omega + \omega_c)H_o(\omega) \\ &\quad + M(\omega - 2\omega_c) + M(\omega)]H_i(\omega - \omega_c)H_o(\omega) \end{aligned}$$

Modulação com Banda Lateral Vestigial

- Como $H_o(\omega)$ é um filtro passa-baixas, as componentes em $\pm 2\omega_c$ são eliminadas, assim:

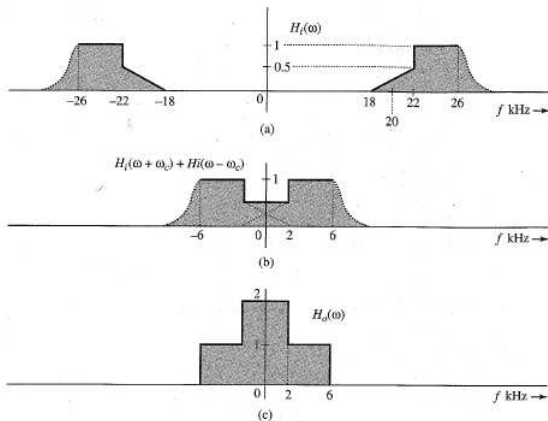
$$M(\omega) = M(\omega)[H_i(\omega + \omega_c) + H_i(\omega - \omega_c)]H_o(\omega)$$

- Logo, o filtro equalizador é dado por:

$$H_o(\omega) = \frac{1}{H_i(\omega + \omega_c) + H_i(\omega - \omega_c)}, \quad |\omega| \leq 2\pi B$$

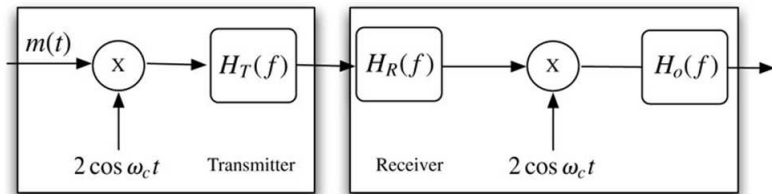
Exemplo

Obter o filtro $H_o(\omega)$ para um sinal VSB com $f_c = 20\text{KHz}$ e $B = 6\text{KHz}$.



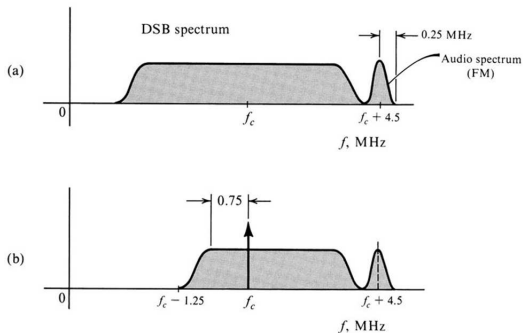
VSB na Difusão de Televisão

- A modulação VSB permite que o sinal de TV (4,5 MHz em banda base) possa ser transmitido em uma banda de 6MHz ao invés de 9MHz usando DSB
- Para que haja a demodulação por detecção de envelope, a portadora é enviada junto com o sinal



VSB na Difusão de Televisão

- O filtro equalizador $H_o(\omega)$ é obtido a partir de $H_i(\omega) = H_T(\omega)H_R(\omega)$



Aquisição da Portadora

- Para as modulações com portadora suprimida (DSB-SC, SSB-SC e VSB-SC) é necessário gerar uma portadora no receptor para efetuar a demodulação
- Se o sinal recebido é $m(t) \cos \omega_c t$ e a portadora do receptor é $2 \cos [(\omega_c + \Delta\omega)t + \delta]$, tem-se que:

$$\begin{aligned} e(t) &= 2m(t) \cos \omega_c t \cos [(\omega_c + \Delta\omega)t + \delta] \\ &= m(t) \{ \cos [(\Delta\omega)t + \delta] + \cos [(2\omega_c + \Delta\omega)t + \delta] \} \end{aligned}$$

- Após o filtro passa-baixas, o sinal resultante $e_o(t)$ é dado por:

$$e_o(t) = m(t) \cos [(\Delta\omega)t + \delta]$$

Aquisição da Portadora

- Três situações podem ser analisadas:
 - Não há erro de fase nem de frequência ($\Delta\omega = \delta = 0$)

$$e_o(t) = m(t)$$

- Há apenas erro de fase ($\Delta\omega = 0$)

$$e_o(t) = m(t) \cos \delta$$

- Há apenas erro de frequência ($\delta = 0$)

$$e_o(t) = m(t) \cos(\Delta\omega)t$$

- A primeira situação representa o caso ideal, o sinal é demodulado corretamente

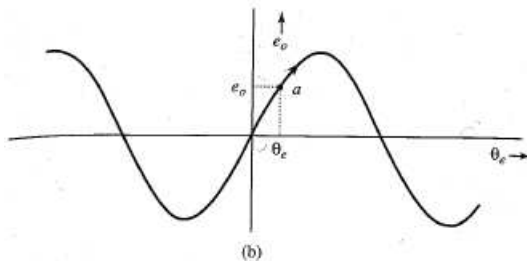
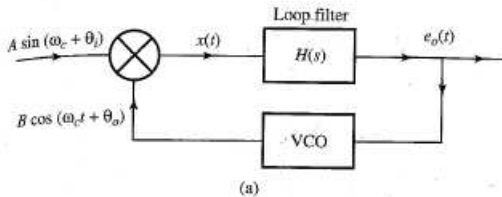
Aquisição da Portadora

- Na segunda situação ($\Delta\omega = 0$), o sinal sofre atenuação, mas sem distorção se δ for constante
 - Devido ao efeito de muitos canais práticos, δ varia aleatoriamente com o tempo
- Na terceira situação ($\delta = 0$), o sinal $m(t)$ é multiplicado por uma senóide de baixa frequência
 - Surge o efeito de batimento, cujo efeito se assemelha a alguém aumentando e diminuindo o volume periodicamente
- Para garantir frequências idênticas no transmissor e receptor podem ser empregados osciladores de cristais de quartzo
 - Um cristal é cortado e partes do cristal são empregadas na transmissão e recepção
 - Em frequências altas, o desempenho desses osciladores não é tão bom

Phase-Locked Loop (PLL)

- Para se rastrear a fase e a frequência de uma portadora de um sinal recebido, pode-se usar um PLL
- Um PLL é um circuito com realimentação com três elementos básicos
 - Um oscilador controlado por tensão (VCO)
 - Um multiplicador com a função de detector ou comparador de fase
 - Um filtro $H(s)$
- O objetivo do PLL é fazer com que a fase do VCO seja a mais próxima possível da fase do sinal de entrada

Phase-Locked Loop (PLL)



Phase-Locked Loop (PLL)

- A saída do VCO é uma senóide cuja frequência instantânea varia de acordo com a tensão de entrada $e_o(t)$ da seguinte maneira:

$$\omega(t) = \omega_c + ce_o(t)$$

- Se a entrada do PLL for $A \sin(\omega_c t + \theta_i)$ e a saída do VCO for $B \cos(\omega_c t + \theta_o)$, então a saída do multiplicador é:

$$\begin{aligned} x(t) &= AB \sin(\omega_c t + \theta_i) \cos(\omega_c t + \theta_o) \\ &= \frac{AB}{2} [\sin(\theta_i - \theta_o) + \sin(2\omega_c t + \theta_i + \theta_o)] \end{aligned}$$

Phase-Locked Loop (PLL)

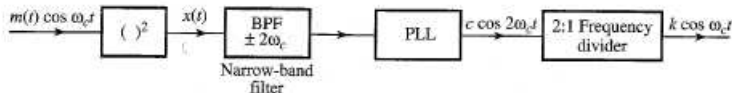
- O filtro $H(s)$ é um filtro passa-baixas de banda estreita que elimina as componentes de alta frequência de $x(t)$, resultando em:

$$e_o = \frac{AB}{2} \sin(\theta_i - \theta_o) = \frac{AB}{2} \sin \theta_e, \quad (\theta_e = \theta_i - \theta_o)$$

- No regime permanente, as frequências de entrada e saída são idênticas
- Se a frequência de entrada é aumentada repentinamente, ou seja $A \cos[(\omega_c + k)t + \theta_i] = A \cos(\omega_c t + \hat{\theta}_i)$, com $\hat{\theta}_i = kt + \theta_i$, então θ_e e e_o também aumentam e conseqüentemente, a frequência na saída do VCO aumenta para acompanhar a entrada

Aquisição da Portadora em AM DSB-SC

- Para obter o sinal da portadora na modulação AM DSB-SC, pode-se utilizar um dos dois métodos seguintes:
 - Método quadrático
 - Malha de Costas
- Método quadrático



Aquisição da Portadora em AM DSB-SC

- No método quadrático, a saída $x(t)$ é dada por:

$$x(t) = [m(t) \cos \omega_c t]^2 = \frac{1}{2}m^2(t) + \frac{1}{2}m^2(t) \cos 2\omega_c t$$

- Como $m^2(t)$ é um sinal com nível DC não nulo, ele pode ser escrito na forma:

$$\frac{1}{2}m^2(t) = k + \phi(t)$$

- Logo:

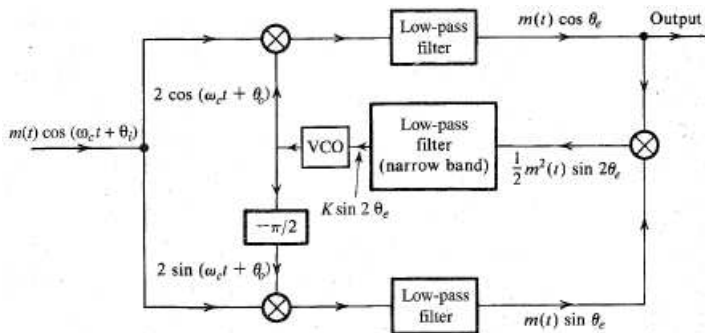
$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{1}{2}m^2(t) + \frac{1}{2}m^2(t) \cos 2\omega_c t \\ &= \frac{1}{2}m^2(t) + k \cos 2\omega_c t + \phi(t) \cos 2\omega_c t \end{aligned}$$

Aquisição da Portadora em AM DSB-SC

- O sinal $m^2(t)$ e a maior parte do espectro de $\phi(t) \cos 2\omega_c t$ é suprimido pelo filtro, restando aproximadamente o sinal $k \cos 2\omega_c t$ com alguma interferência
- A saída do filtro entra no PLL que produz uma senóide pura
- Finalmente, utiliza-se um divisor de frequência para produzir a frequência desejada com a fase correta

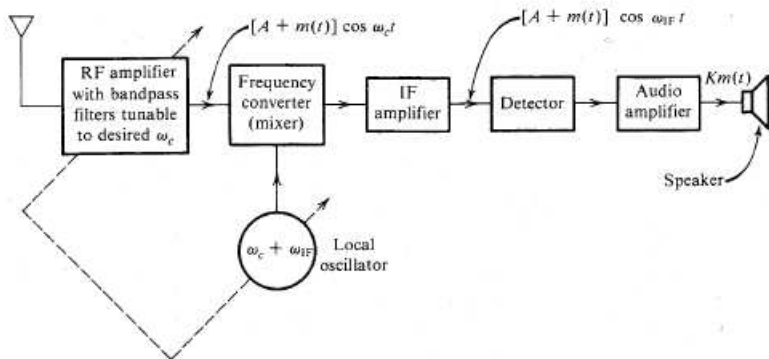
Aquisição da Portadora em AM DSB-SC

- Uma idéia similar ao método quadrático é empregada na malha de Costas mostrada a seguir:



Receptor AM Super-heteródino

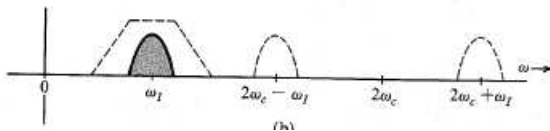
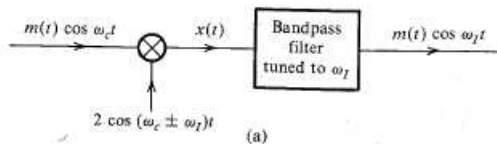
- O receptor de rádio usado nos sistemas que empregam a modulação AM tradicional é chamada de **receptor AM super-heteródino**



Receptor AM Super-heteródino

- Uma das características fundamentais desse receptor é que a detecção do envelope é feita em uma frequência intermediária (455 kHz - abaixo da frequência da portadora)
- A conversão de frequências é feita com um misturador (*mixer*)
- Se a intenção é passar de uma frequência ω_c para uma frequência ω_I , então realiza-se as seguintes operações:
 - Multiplicação do sinal modulado por uma portadora na frequência $\omega_{mix} = \omega_c + \omega_I$ ou $\omega_{mix} = \omega_c - \omega_I$
 - Filtragem na frequência ω_I

Receptor AM Super-heteródino



Receptor AM Super-heteródino

- Como

$$\begin{aligned}x(t) &= 2m(t) \cos \omega_c t \cos \omega_{mix} t \\ &= m(t) [\cos (\omega_c - \omega_{mix}) t + \cos (\omega_c + \omega_{mix}) t]\end{aligned}$$

- Se $\omega_{mix} = \omega_c - \omega_I$ (conversão para baixo), então:

$$x(t) = m(t) [\cos \omega_I t + \cos (2\omega_c - \omega_I) t]$$

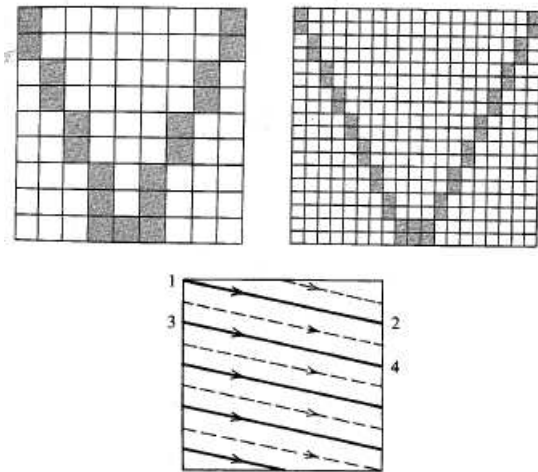
- Se $\omega_{mix} = \omega_c + \omega_I$ (conversão para cima), então:

$$x(t) = m(t) [\cos \omega_I t + \cos (2\omega_c + \omega_I) t]$$

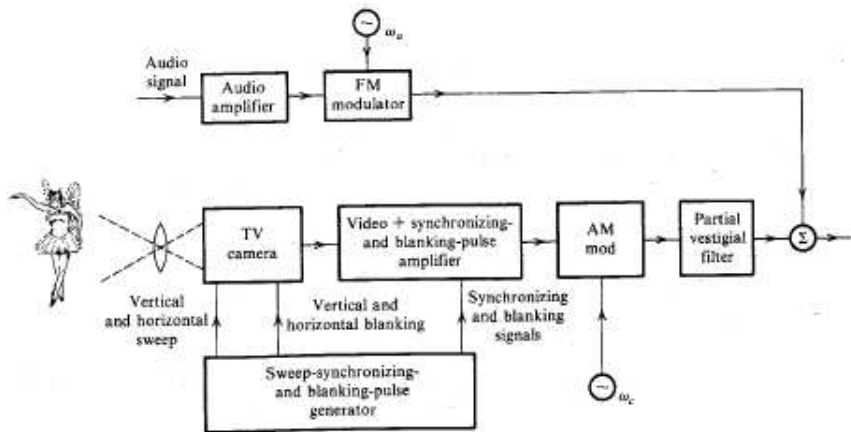
Receptor AM Super-heteródino

- No caso do receptor super-heteródino, é realizada a conversão para cima com $f_i = 455\text{kHz}$ e f_c sendo a frequência da portadora da estação desejada
- A sintonia do filtro de RF e da frequência do oscilador do misturador é feita com o mesmo botão
- Em uma frequência mais baixa, é mais fácil projetar filtros passa-faixa para a banda do sinal de voz
- Portanto, o filtro de RF faz uma filtragem grosseira e a filtragem mais fina é feita em $f_i = 455\text{kHz}$
 - Proteção contra "estações imagem"
 - Uma portadora com frequência $f_c = 1000\text{kHz}$ resulta em $f_{MIX} = 1455\text{kHz}$, mas uma estação com $f'_c = 1910\text{kHz}$ pode ser capturada, pois $1910\text{kHz} - 1455\text{kHz} = 455\text{kHz}$

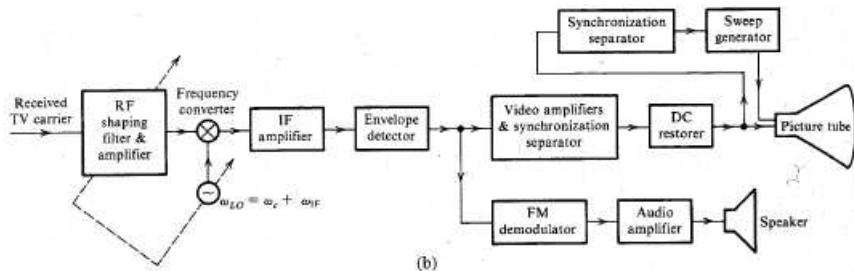
Televisão



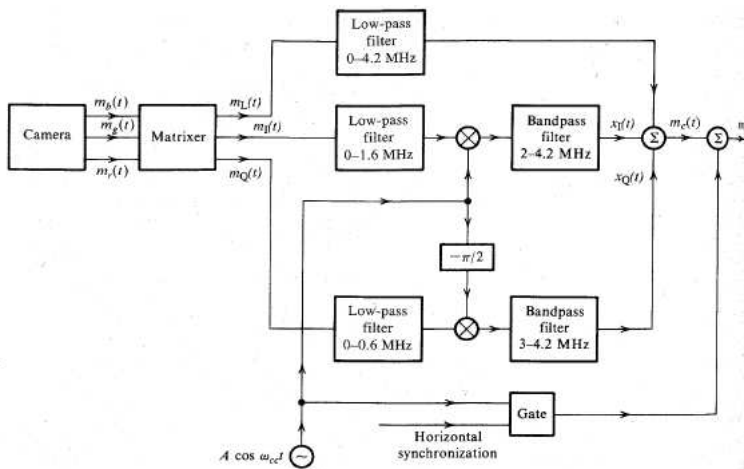
Televisão



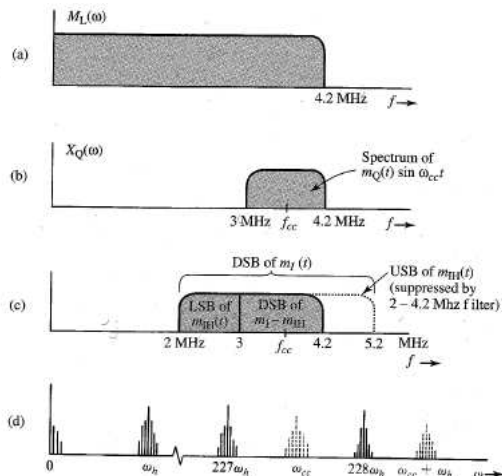
Televisão



Televisão



Televisão



Televisão

