

Modulação em Amplitude (Circuitos)

Edmar J Nascimento

Universidade Federal do Vale do São Francisco
Colegiado de Engenharia Elétrica

www.univasf.edu.br/~edmar.nascimento

September 26, 2020

Transmissores e Receptores (Circuitos)

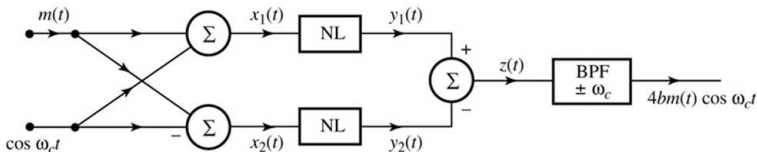
- Para implementar as funções de modulação e demodulação vistas anteriormente, é necessário fazer uso da eletrônica
- As especificações detalhadas dos circuitos não serão vistas aqui
- Livros específicos sobre o assunto podem ser consultados
- Circuitos podem estar disponíveis em CIs
- Conhecimentos básicos sobre circuitos elétricos permitem compreender o funcionamento geral

DSB-SC (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)

DSB-SC (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



DSB-SC (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,

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

DSB-SC (Moduladores Chaveados)

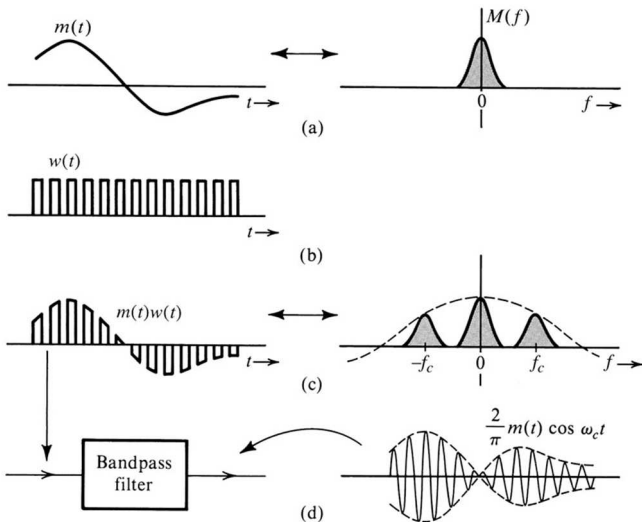
- Para uma onda quadrada, por exemplo, a decomposição em séries de Fourier resulta em

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

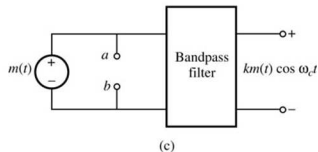
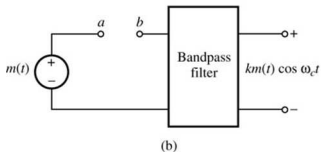
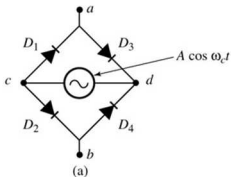
- Logo,

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

DSB-SC (Moduladores Chaveados)



DSB-SC (Moduladores Chaveados)



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

DSB-SC (Moduladores Chaveados)

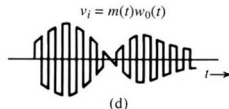
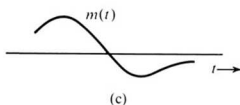
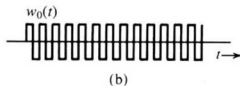
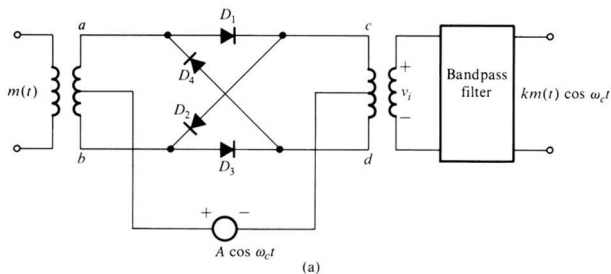
- Outra opção de modulador chaveado é o modulador em anel (nível DC nulo)
- Nesse caso,

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

- Logo,

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

DSB-SC (Moduladores em Anel)

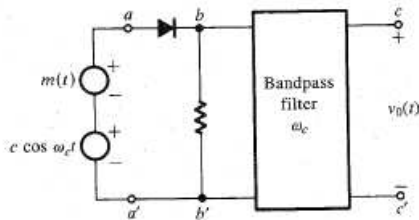


AM-DSB-SC (Demodulação)

- 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

AM (Geração)

- 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



AM (Geração)

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

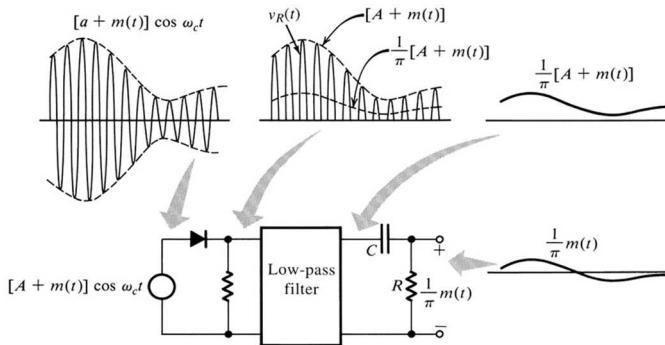
$$\begin{aligned}v_{bb'} &= [c \cos \omega_c t + m(t)]w(t) \\&= [c \cos \omega_c t + m(t)]\left\{\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi}\left(\cos \omega_c t - \frac{1}{3} \cos \omega_c t + \dots\right)\right\} \\&= \underbrace{\frac{c}{2} \cos \omega_c t + \frac{2}{\pi} m(t) \cos \omega_c t}_{AM} + \text{Termos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

AM (Demodulação)

- 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

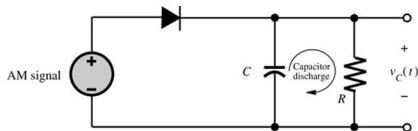
$$\begin{aligned}v_R &= \{[A + m(t)] \cos \omega_c t\} w(t) \\&= [A + m(t)] \cos \omega_c t \left\{ \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left(\cos \omega_c t - \frac{1}{3} \cos \omega_c t + \dots \right) \right\} \\&= \frac{1}{\pi} [A + m(t)] + \text{Termos extras}\end{aligned}$$

AM (Detector Retificador)



AM (Detector de Envelope)

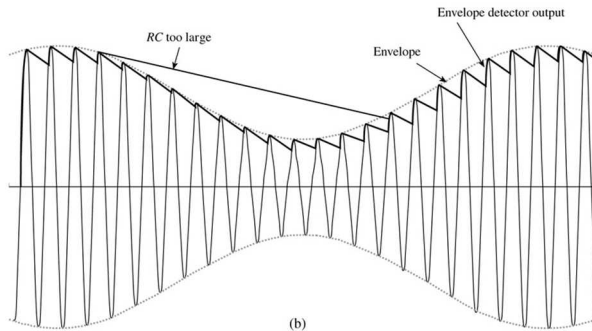
- No detector de envelope, o capacitor é carregado durante o ciclo positivo e descarrega quando o diodo é cortado



- 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

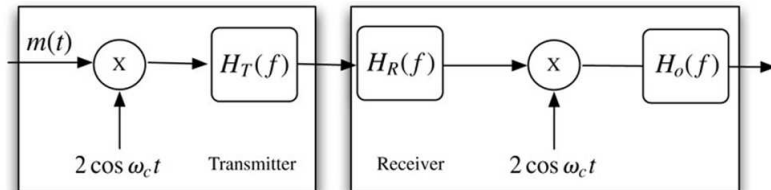
$$1/\omega_c \ll RC < 1/(2\pi B) \text{ ou } 2\pi B < 1/(RC) \ll \omega_c$$

AM (Detector de Envelope)



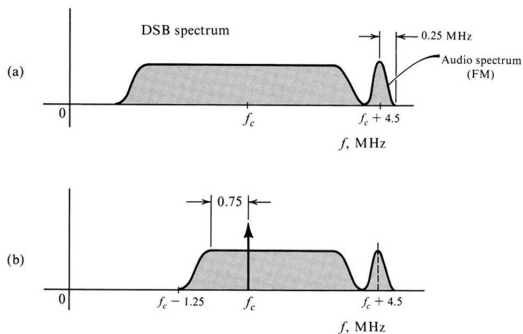
VSB na Difusão de Televisão

- 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



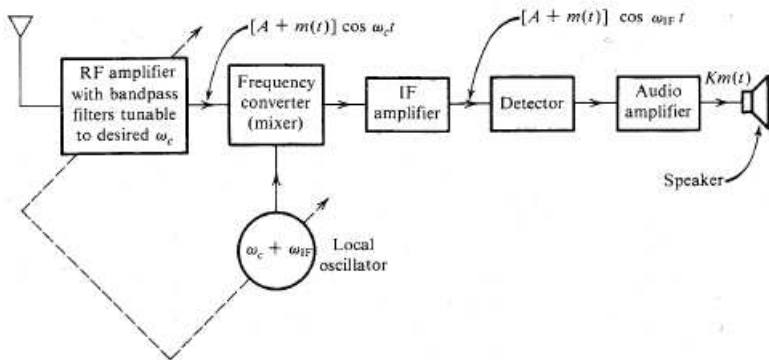
VSB na Difusão de Televisão

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



Receptor AM Super-heteródino

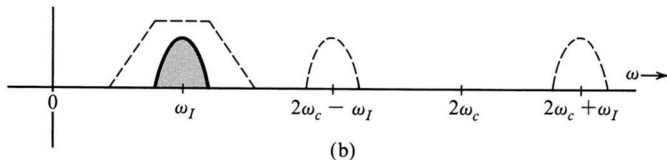
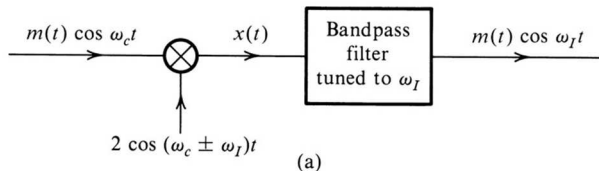
- O receptor de rádio usado nos sistemas que empregam a modulação AM tradicional é chamada de **receptor AM super-heteródino**



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 $f_I = 455kHz$ 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 $f_I = 455kHz$
 - Proteção contra "estações imagem"
 - Uma portadora com frequência $f_c = 1000kHz$ resulta em $f_{MIX} = 1455kHz$, mas uma estação com $f'_c = 1910kHz$ pode ser capturada, pois $1910kHz - 1455kHz = 455kHz$