

TE342 – Fundamentos de Comunicação

Sistemas de Modulação de Onda Contínua

Evelio M. G. Fernández

30 de setembro de 2019

Notes

Evelio M. G. Fernández

TE342 – Modulação de Onda Contínua

Modulação de Onda Contínua

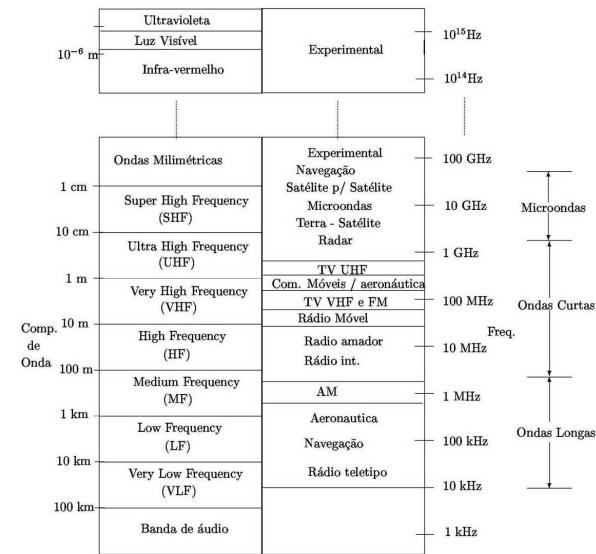
- **Modulação:** alteração sistemática de alguma característica de um sinal, denominado portadora, em função de um segundo sinal denominado modulante ou mensagem.
- **Objetivo:** conduzir a informação através de um sinal modulado cujas propriedades sejam apropriadas ao canal de comunicação em consideração.

Notes

Evelio M. G. Fernández

TE342 – Modulação de Onda Contínua

Uso do Espectro de Radiofrequências



Notes

Formas Lineares de Modulação

$$\tilde{g}(t) = g_I(t) + jg_Q(t) = a(t) \exp[j\phi(t)],$$

$a(t)$ e $\phi(t)$ → funções passa-baixas de valor real.

$$\begin{aligned}\Rightarrow g(t) &= \Re[\tilde{g}(t) \exp(j2\pi f_c t)] = \Re[a(t) \exp(j[2\pi f_c t + \phi(t)])] \\ &= a(t) \cos[2\pi f_c t + \phi(t)].\end{aligned}$$

Modulação de Amplitude: Informação transportada pela envoltória da portadora de RF:

$$a(t) = |\tilde{g}(t)| = \sqrt{g_I^2(t) + g_Q^2(t)}.$$

Modulação de Fase: Informação transportada pela fase da portadora de RF:

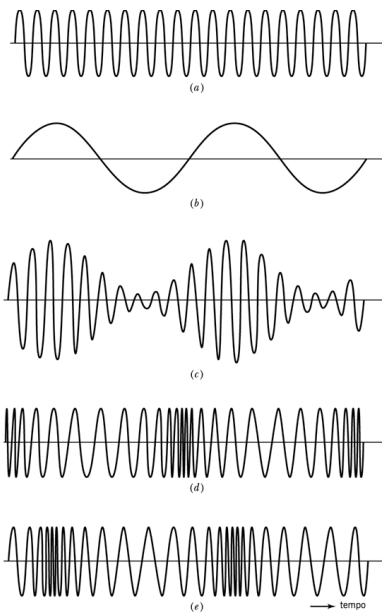
$$\phi(t) = \arctan \left[\frac{g_Q(t)}{g_I(t)} \right] = \Im(\ln[\tilde{g}(t)]).$$

Modulação de FrequênciA: Informação transportada pela diferença entre o valor da frequência instantânea da portadora de RF modulada e o valor da frequência portadora, f_c :

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\arctan \left[\frac{g_Q(t)}{g_I(t)} \right] \right).$$

Notes

Ilustração de Sinais AM, PM e FM



Notes

Processo de Modulação de Amplitude

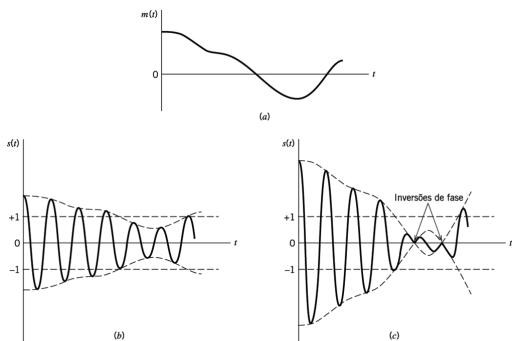


Ilustração do processo de modulação em amplitude. (a) Sinal de Banda base $m(t)$. (b) Onda AM para $|k_a m(t)| < 1$ para todo t . (c) Onda AM para $|k_a m(t)| > 1$ para algum t .

- Onda portadora: $c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)$
- Sinal modulado: $s(t) = A_c [1 + k_a m(t)] \cos(2\pi f_c t)$

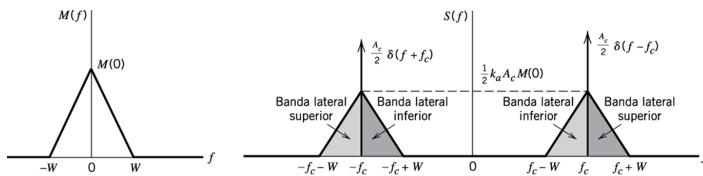
A envoltória será igual à mensagem se:

- ➊ $|k_a m(t)| < 1$ para todo t
- ➋ $f_c \gg W$

Notes

Modulação AM no Domínio da Frequência

Notes



$$S(f) = \frac{A_c}{2} [\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)] + \frac{k_a A_c}{2} [M(f - f_c) + M(f + f_c)]$$

Evelio M. G. Fernández

TE342 – Modulação de Onda Contínua

Exemplo: Modulação por um único tom senoidal

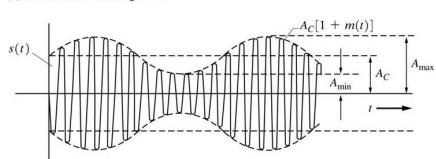
Notes

$$m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t)$$

$s(t) = A_c [1 + \mu \cos(2\pi f_m t)] \cos(2\pi f_c t)$, onde $\mu = k_a A_m \rightarrow$ índice de modulação



(a) Sinusoidal Modulating Wave

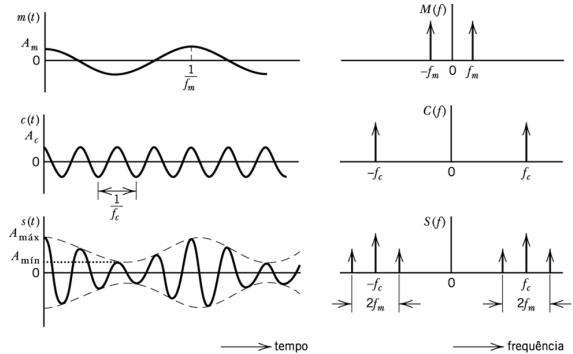


(b) Resulting AM Signal

$$\mu = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}}$$

$$s(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) + \frac{\mu A_c}{2} \cos[2\pi(f_c + f_m)t] + \frac{\mu A_c}{2} \cos[2\pi(f_c - f_m)t]$$

Exemplo: Modulação por um único tom senoidal



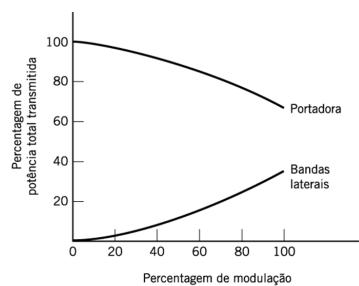
$$\begin{aligned} S(f) = & \frac{A_c}{2} [\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)] + \\ & + \frac{\mu A_c}{4} [\delta(f - f_c - f_m) + \delta(f + f_c + f_m)] + \\ & + \frac{\mu A_c}{4} [\delta(f - f_c + f_m) + \delta(f + f_c - f_m)]. \end{aligned}$$

Evelio M. G. Fernández

TE342 – Modulação de Onda Contínua

Notes

Eficiência de Potência AM



$$\eta = \frac{\text{Potência nas bandas laterais}}{\text{Potência total transmitida}} = \frac{\frac{\mu^2 A_c^2}{4}}{\frac{\mu^2 A_c^2}{4} + \frac{A_c^2}{2}} = \frac{\mu^2}{\mu^2 + 2} \times 100\%$$

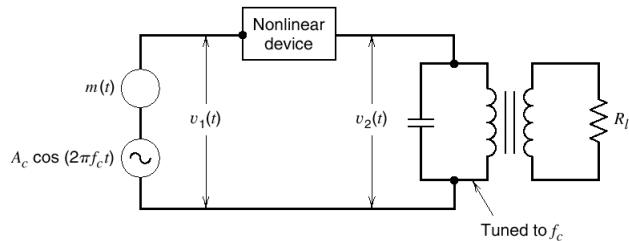
Notes

Evelio M. G. Fernández

TE342 – Modulação de Onda Contínua

Modulador AM de Lei Quadrática (Prob. 2.2 – Haykin)

Notes



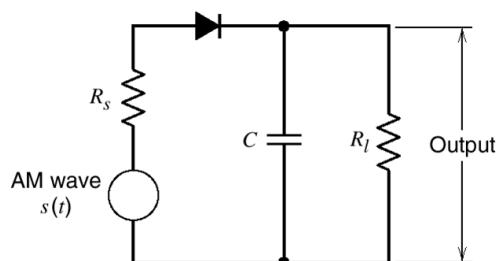
$$v_2(t) = a_1 v_1(t) + a_2 v_1^2(t)$$

$$v_1(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) + m(t)$$

- a) Avalie a tensão de saída, $v_2(t)$
- b) Esboce $V_2(f)$
- c) Qual o valor de k_a ?

Detector de Envoltória

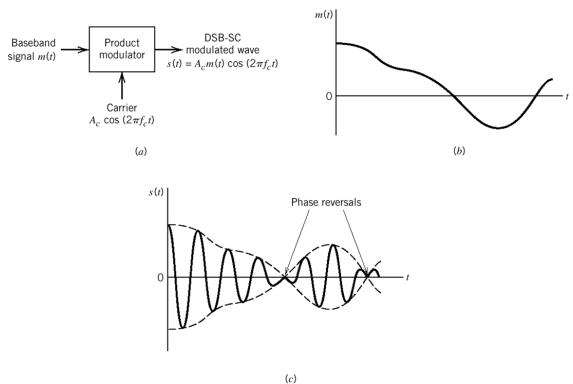
Notes



$$(r_f + R_s)C \ll \frac{1}{f_c}, \quad \frac{1}{f_c} \ll R_l C \ll \frac{1}{W}$$

Modulação de Banda Lateral Dupla e Portadora Suprimida (AM DSB-SC)

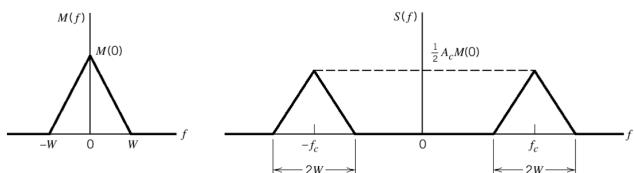
Notes



Evelio M. G. Fernández TE342 – Modulação de Onda Contínua

Espectro da Modulação AM DSB-SC

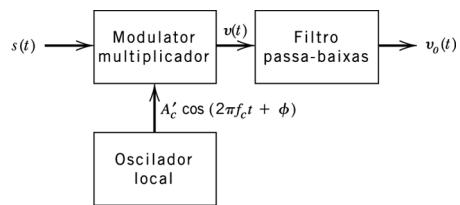
Notes



$$S(f) = \frac{1}{2} A_c [M(f - f_c) + M(f + f_c)]$$

Evelio M. G. Fernández TE342 – Modulação de Onda Contínua

Detecção Coerente



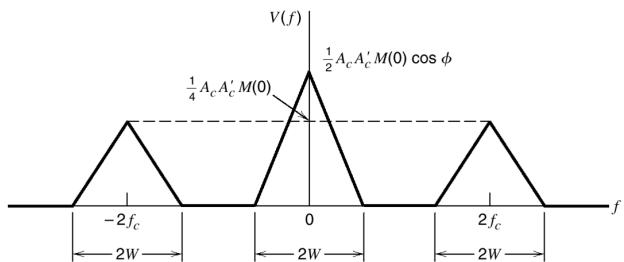
Notes

$$\begin{aligned}v(t) &= A'_c \cos(2\pi f_c t + \phi) s(t) \\&= A_c A'_c \cos(2\pi f_c t) \cos(2\pi f_c t + \phi) m(t) \\&= \frac{1}{2} A_c A'_c \cos(4\pi f_c t + \phi) m(t) + \frac{1}{2} A_c A'_c \cos(\phi) m(t)\end{aligned}$$

$$v_o(t) = \frac{1}{2} A_c A'_c \cos(\phi) m(t)$$

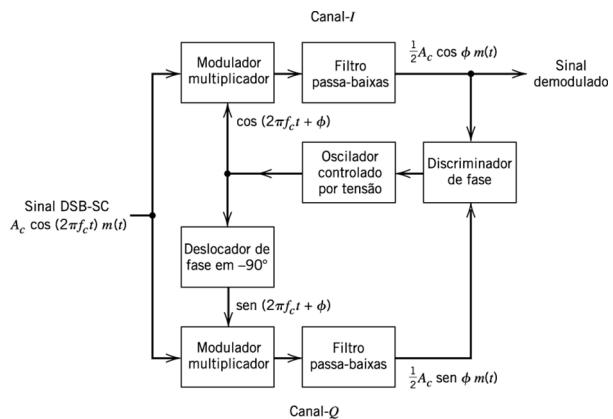
Evelio M. G. Fernández TE342 – Modulação de Onda Contínua

Saída do Modulador Produto no domínio da Frequência

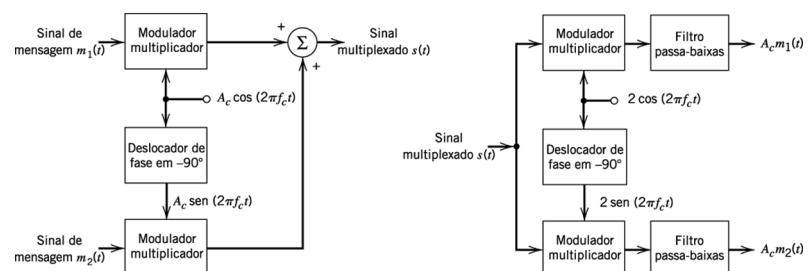


Notes

Evelio M. G. Fernández TE342 – Modulação de Onda Contínua



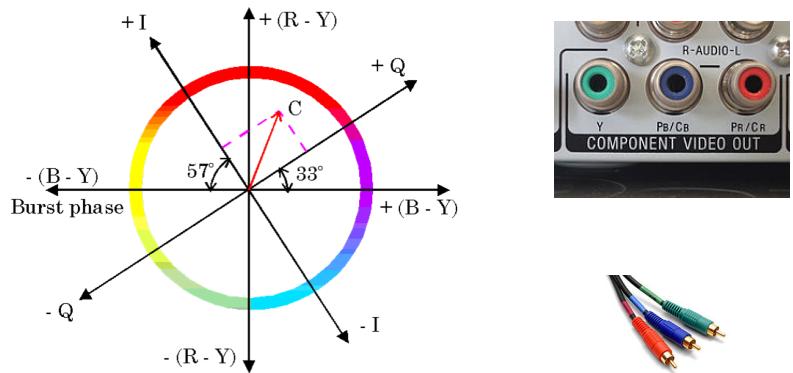
Modulação de Amplitude em Quadratura (QAM)



$$s(t) = m_1(t)A_c \cos(2\pi f_c t) + m_2(t)A_c \sin(2\pi f_c t)$$

Exemplo de Modulação QAM: Sinal de Vídeo Composto

Notes



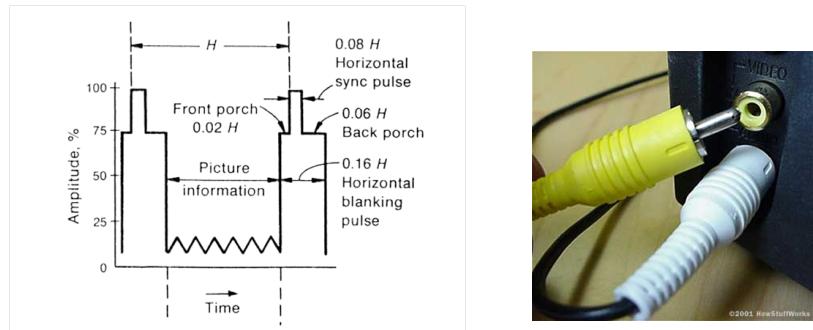
$$C = (R-Y) \cos(2\pi f_{\text{sub}} t) + (B-Y) \sin(2\pi f_{\text{sub}} t), \quad f_{\text{sub}} \approx 3,58 \text{ MHz}$$

Evelio M. G. Fernández

TE342 – Modulação de Onda Contínua

Exemplo de Modulação QAM: Sinal de Vídeo Composto

Notes



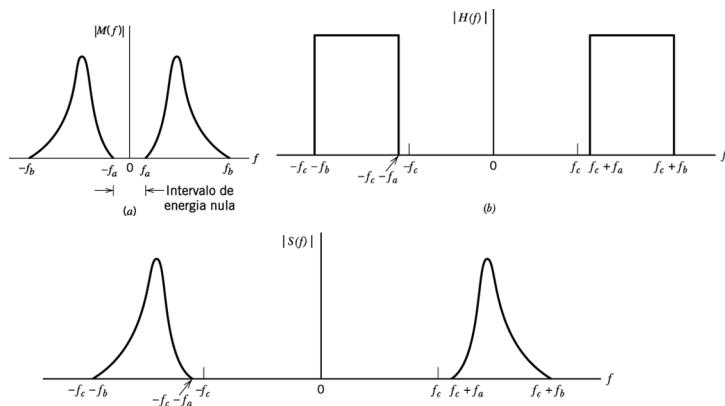
$$\text{vídeo composto} = Y + C + \text{blanking} + \text{sync}$$

Evelio M. G. Fernández

TE342 – Modulação de Onda Contínua

Modulação de Banda Lateral Única (SSB)

Notes



Evelio M. G. Fernández TE342 – Modulação de Onda Contínua

Exemplo: Problema 2.16 – Haykin

Notes

Usando a definição da transformada de Hilbert, mostre que um sinal modulado em banda lateral única resultante do sinal de mensagem $m(t)$ e da portadora $\cos(2\pi f_c t)$ de amplitude unitária é dado por:

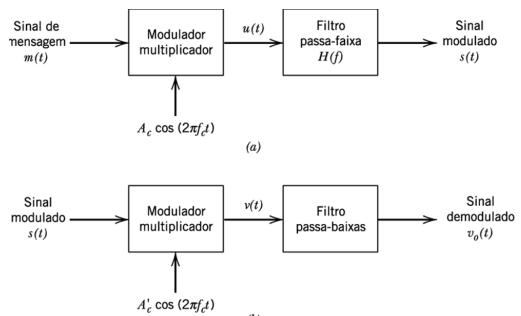
$$s(t) = \frac{1}{2}m(t)\cos(2\pi f_c t) \pm \frac{1}{2}\hat{m}(t)\sin(2\pi f_c t)$$

onde o sinal menos corresponde à transmissão da banda lateral superior e o sinal mais, à transmissão da inferior.

Evelio M. G. Fernández TE342 – Modulação de Onda Contínua

Modulação AM-VSB

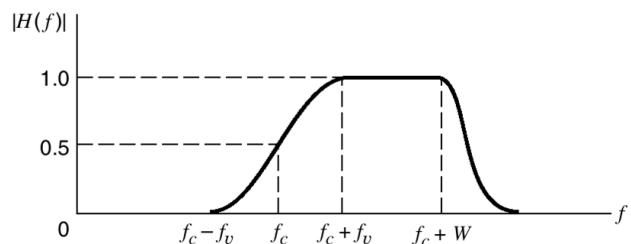
Notes



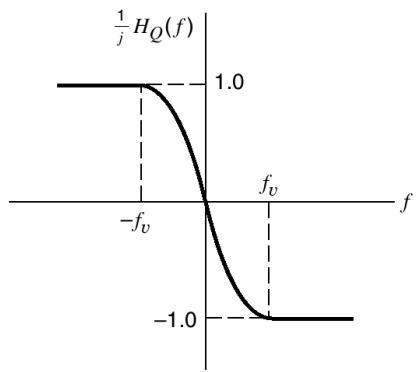
$$s(t) = \frac{1}{2} A_c m(t) \cos(2\pi f_c t) \pm \frac{1}{2} A_c m'(t) \sin(2\pi f_c t)$$

Resposta em Amplitude do Filtro VSB

Notes



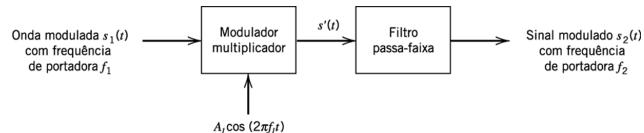
Notes



$$H_Q(f) = j[H(f - f_c) - H(f + f_c)] \quad \text{para } -W \leq f \leq W$$

Translação de Frequência

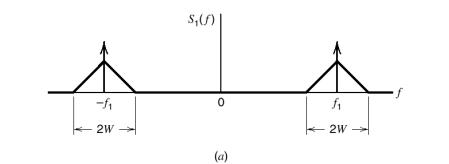
Notes



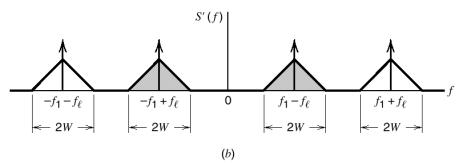
$$\begin{aligned} s'(t) &= s_1(t) \times A_l \cos(2\pi f_l t) \\ &= m(t) \cos(2\pi f_1 t) \times A_l \cos(2\pi f_l t) \\ &= \frac{1}{2} A_l m(t) [\cos(2\pi(f_1 + f_l)t) + \cos(2\pi(f_1 - f_l)t)] \end{aligned}$$

Espectro dos Sinais na Entrada e na Saída do Multiplicador

Notes



(a)

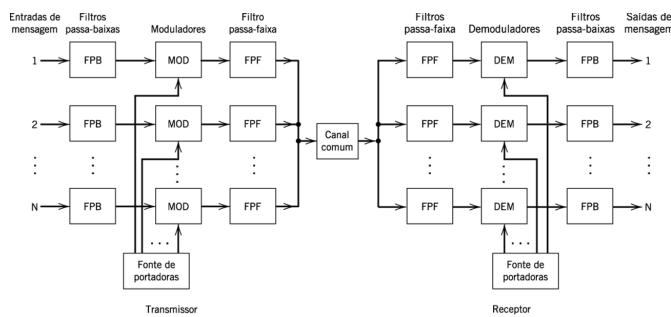


(b)

Evelio M. G. Fernández TE342 – Modulação de Onda Contínua

Diagrama em Blocos de um Sistema FDM

Notes



Evelio M. G. Fernández TE342 – Modulação de Onda Contínua

Modulação Angular

Notes

$$s(t) = A_c \cos[\theta_i(t)],$$

onde $\theta_i(t) \rightarrow$ ângulo de uma portadora senoidal no tempo t .

A frequência média em Hz ao longo de um intervalo que varia de t a $t + \Delta t$ é dada por

$$f_{\Delta t}(t) = \frac{\theta_i(t + \Delta t) - \theta_i(t)}{2\pi\Delta t}$$

⇒ **Frequência instantânea** do sinal com modulação angular:

$$\begin{aligned} f_i(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} f_{\Delta t}(t) \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\theta_i(t + \Delta t) - \theta_i(t)}{2\pi\Delta t} \\ &= \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_i(t)}{dt} \end{aligned}$$

Evelio M. G. Fernández

TE342 – Modulação de Onda Contínua

Modulação de Fase e Modulação de Frequência

Notes

Modulação de fase (PM): O ângulo $\theta_i(t)$ é variado linearmente com o sinal de mensagem $m(t)$:

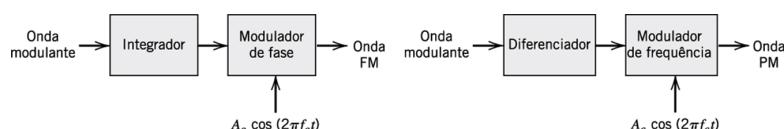
$$\theta_i(t) = 2\pi f_c t + k_p m(t) \implies s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + k_p m(t)],$$

onde $k_p \rightarrow$ sensibilidade à fase do modulador.

Modulação de frequência (FM): A frequência instantânea $f_i(t)$ é variada linearmente com o sinal de mensagem $m(t)$:

$$f_i(t) = f_c + k_f m(t) \implies s(t) = A_c \cos \left[2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau \right],$$

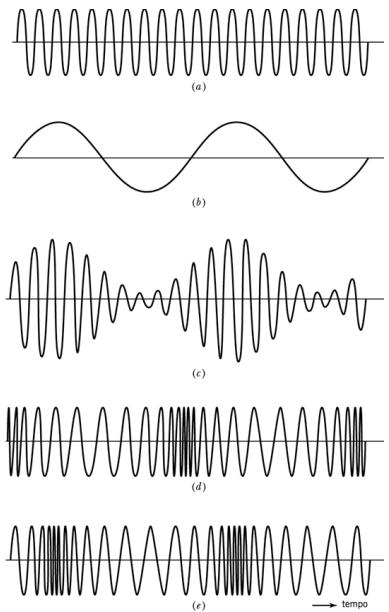
onde $k_f \rightarrow$ sensibilidade à frequência do modulador.



Evelio M. G. Fernández

TE342 – Modulação de Onda Contínua

Ilustração de Sinais AM, PM e FM



Notes

Propriedades das Ondas com Modulação Angular

- ① Constância da Potência Transmitida

$$P_{\text{med}} = \frac{1}{2} A_c^2;$$

- ② Não lineariedade do processo de modulação;
- ③ Irregularidades de cruzamentos por zero;
- ④ Dificuldade de visualização da forma de onda da mensagem;
- ⑤ Relação de compromisso entre o aumento da largura de banda de transmissão e a melhora do desempenho em relação a ruído.

Notes

Representação Complexa de Sinais FM

Notes

$$\begin{aligned}s(t) &= A_c \cos \left[2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau \right] \\&= \Re \left\{ A_c e^{j2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau} \cdot e^{j2\pi f_c t} \right\} \\&= \Re \left\{ \tilde{s}(t) e^{j2\pi f_c t} \right\}\end{aligned}$$

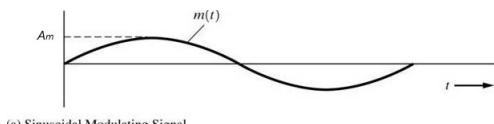
$$\implies \tilde{s}(t) = A_c e^{j2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau} = a(t) e^{j\phi(t)}$$

$$\text{onde } a(t) = A_c, \quad \phi(t) = 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau$$

$$\implies \tilde{s}(t) = \underbrace{A_c \cos \left(2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau \right)}_{s_I(t)} + j \underbrace{A_c \sin \left(2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau \right)}_{s_Q(t)}$$

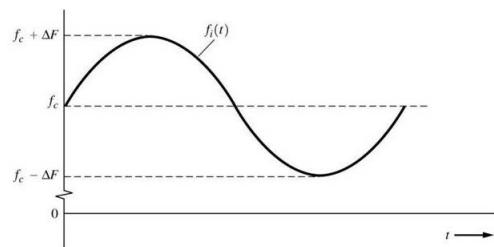
Evelio M. G. Fernández TE342 – Modulação de Onda Contínua

Modulação FM por um Único Tom Senoidal



(a) Sinusoidal Modulating Signal

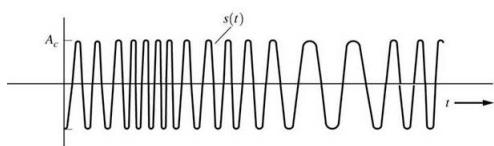
$$m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t),$$



(b) Instantaneous Frequency of the Corresponding FM Signal

$$\begin{aligned}f_i(t) &= f_c + k_f m(t) \\&= f_c + k_f A_m \cos(2\pi f_m t) \\&= f_c + \Delta f \cos(2\pi f_m t)\end{aligned}$$

$$\text{onde } \Delta f = k_f A_m: \text{ desvio de frequência}$$



(c) Corresponding FM Signal

Notes

Modulação FM por um Único Tom Senoidal

Neste caso, o ângulo do sinal FM será:

$$\theta_i(t) = 2\pi \int_0^t f_i(\tau) d\tau = 2\pi f_c t + \frac{\Delta f}{f_m} \sin(2\pi f_m t) = 2\pi f_c t + \beta \sin(2\pi f_m t),$$

onde $\beta = \frac{\Delta f}{f_m}$ → índice de modulação.

Então, o sinal FM e a respectiva envoltória complexa serão:

$$s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + \beta \sin(2\pi f_m t)],$$
$$\tilde{s}(t) = A_c e^{j2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau} = A_c e^{j\beta \sin(2\pi f_m t)}.$$

Note que $\tilde{s}(t)$ é uma função periódica, portanto pode ser expandida numa série de Fourier:

$$\tilde{s}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{j2\pi n f_m t}.$$

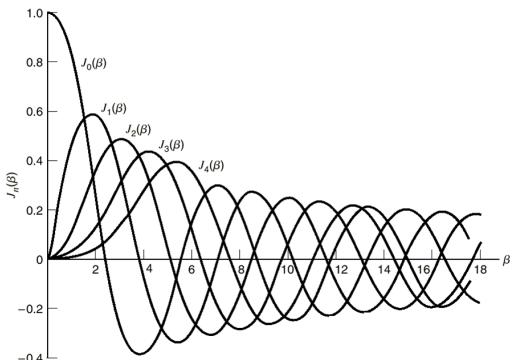
Evelio M. G. Fernández

TE342 – Modulação de Onda Contínua

Notes

Funções de Bessel de Primeira Espécie, $J_n(\beta)$

$$J_n(\beta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp[j(\beta \sin x - nx)] dx$$



$$s(t) = A_c \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \cos[2\pi(f_c + n f_m)t],$$

$$S(f) = \frac{A_c}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} [\delta(f - f_c - n f_m) + \delta(f + f_c + n f_m)].$$

Notes

- ① Para n par, temos $J_n(\beta) = J_{-n}(\beta)$; por outro lado, para n ímpar temos $J_n(\beta) = -J_{-n}(\beta)$. Isto é,

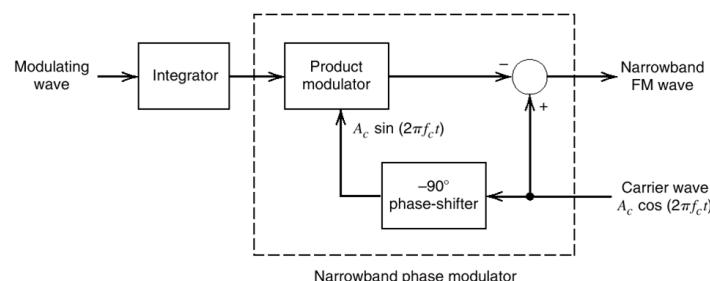
$$J_n(\beta) = (-1)^n J_{-n}(\beta), \text{ para todo } n$$

- ② Para valores pequenos do índice de modulação, β , temos:
 $J_0(\beta) \approx 1, \quad J_1(\beta) \approx \frac{\beta}{2}, \quad J_n(\beta) \approx 0, \quad n > 2$

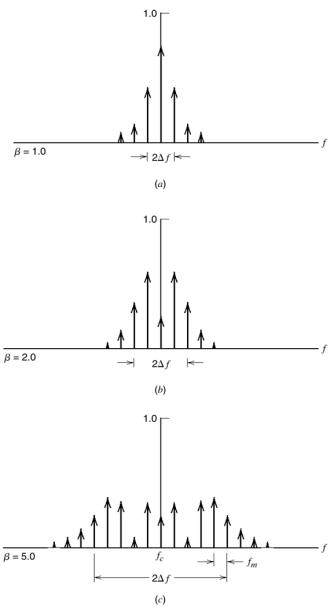
③ $\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(\beta) = 1$

Sinal FM de Banda Estreita ($\beta \ll 1$ radiano)

$$\begin{aligned} s(t) &\approx A_c \{ J_{-1}(\beta) \cos[2\pi(f_c - f_m)t] + J_0(\beta) \cos(2\pi f_c t) + J_1(\beta) \cos[2\pi(f_c + f_m)t] \} \\ &= A_c \cos(2\pi f_c t) - \beta A_c \sin(2\pi f_c t) \sin(2\pi f_m t) \end{aligned}$$

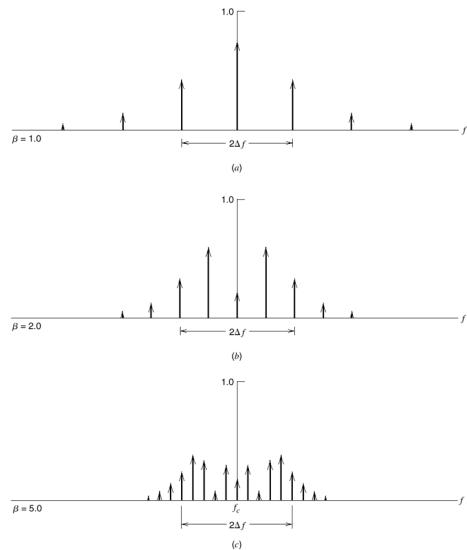


Modulação FM com sinal modulador de frequência fixa e amplitude variável



Notes

Modulação FM com sinal modulador de amplitude fixa e frequência variável



Notes

Notes

- **Regra de Carson**

$$B_T \approx 2\Delta f + 2f_m = 2\Delta f \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

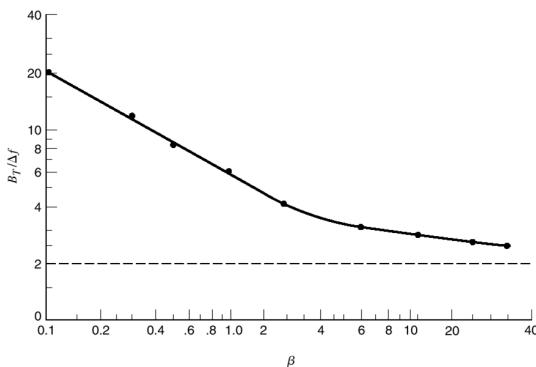
- **Critério de 1%**

Manter o número máximo de frequências laterais significativas cujas amplitudes sejam maiores que 1% da amplitude da portadora não modulada

$B_T = 2n_{max}f_m$, onde n_{max} é o maior inteiro, n , que satisfaz,
 $|J_n(\beta)| > 0.01$

Notes

Índice de Modulação, β	$2n_{max}$
0,1	2
0,3	4
0,5	4
1,0	6
2,0	8
5,0	16
10,0	28
20,0	50
30,0	70



Exercícios

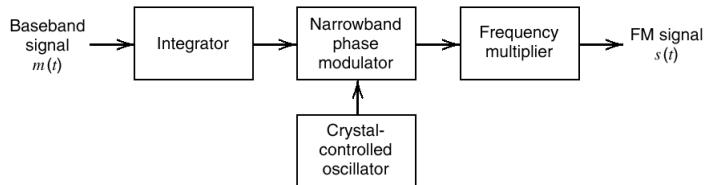
- 1 Problema 2.32 – Haykin:** Um sinal FM com índice de modulação $\beta = 1$ é transmitido através de um filtro passa-faixa ideal com frequência central f_c e largura de banda $5f_m$ em que f_c é a frequência da portadora e f_m é a frequência da onda modulante senoidal. Determine o espectro de amplitude do sinal de saída do filtro. Suponha $A_c = 1$ Volt.
- 2 Problema 2.33 – Haykin:** Uma onda portadora de frequência 100 MHz é modulada em frequência por uma onda senoidal de amplitude 20 Volts e frequência 100 kHz. A sensibilidade à frequência do modulador é de 25 kHz/Volt.
- Determine a largura de banda aproximada do sinal FM utilizando a regra de Carson.
 - Determine a largura de banda pelo critério de 1% (utilize a curva universal).
 - Repita seus cálculos assumindo que a amplitude do sinal modulante seja dobrada.
 - Repita seus cálculos assumindo que a frequência do sinal modulante seja dobrada.

Notes

- **Método direto:** A frequência da onda portadora é variada diretamente de acordo com o sinal de banda base de entrada através de um oscilador controlado por tensão (VCO: *Voltage Controlled Oscillator*) \Rightarrow FM de banda estreita.
- **Método indireto:** O sinal de banda base de entrada é utilizado primeiramente para produzir um sinal FM de banda estreita, e um procedimento de multiplicação de frequência é utilizado em seguida para aumentar o desvio de frequência do sinal FM \Rightarrow FM de banda larga.

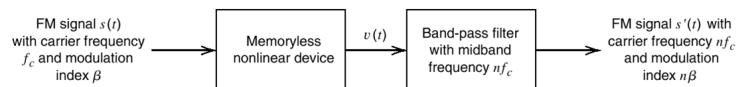
Geração Indireta de um Sinal FM Banda Larga

Notes



Multiplicador de Frequências

Notes



$$v(t) = a_1 s(t) + a_2 s^2(t) + \cdots + a_n s^n(t),$$

onde,

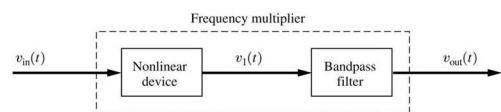
$a_1, a_2, \dots, a_n \rightarrow$ coeficientes determinados pelo ponto de operação do dispositivo não linear;

$n \rightarrow$ ordem de não lineariedade mais elevada.

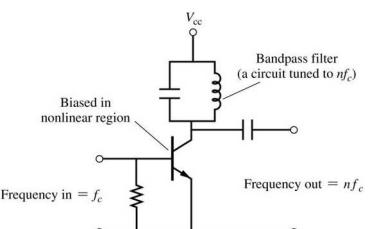
Evelio M. G. Fernández TE342 – Modulação de Onda Contínua

Multiplicador de Frequências

Notes



(a) Block Diagram of a Frequency Multiplier

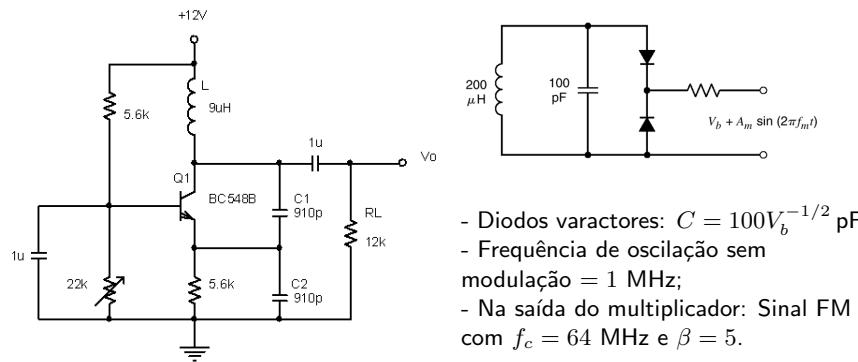


(b) Circuit Diagram of a Frequency Multiplier

Evelio M. G. Fernández TE342 – Modulação de Onda Contínua

Geração FM de Banda Estreita – Prob. 2.38 - Haykin

Notes



- Diodos varactores: $C = 100V_b^{-1/2}$ pF;
- Frequência de oscilação sem modulação = 1 MHz;
- Na saída do multiplicador: Sinal FM com $f_c = 64$ MHz e $\beta = 5$.

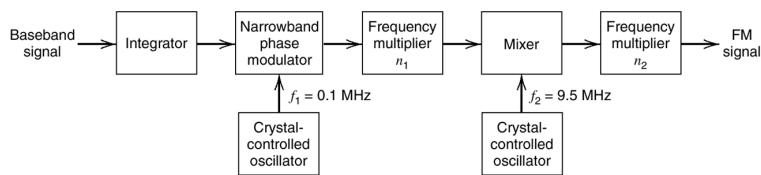
- $V_b = ?$
- Determine o valor de A_m sabendo que $f_m = 10$ kHz.

Evelio M. G. Fernández TE342 – Modulação de Onda Contínua

Geração Indireta de um Sinal FM de Banda Larga

Notes

Método Armstrong (Prob. 2.37 – Haykin)

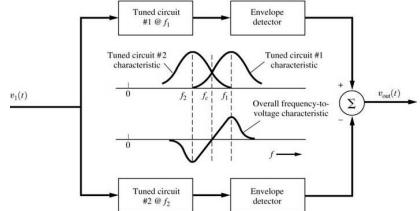


- Sinal FM: $f_c = 100$ MHz, $\Delta f = 75$ kHz (mínimo);
- Considere $\beta_1 = 0,2$ radianos;
- Determine n_1 e n_2 .

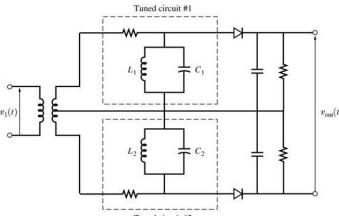
Evelio M. G. Fernández TE342 – Modulação de Onda Contínua

Discriminador de Frequências

Notes



(a) Block Diagram



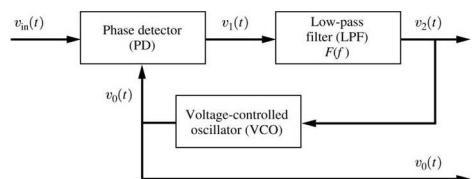
(b) Circuit Diagram

Evelio M. G. Fernández

TE342 – Modulação de Onda Contínua

Demodulação por PLL

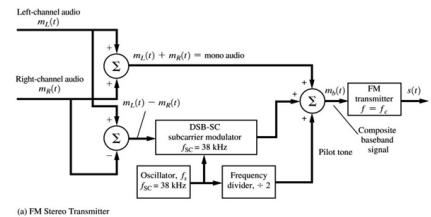
Notes



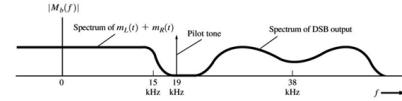
Evelio M. G. Fernández

TE342 – Modulação de Onda Contínua

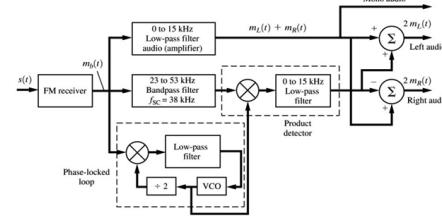
Multiplexação Estereofônica de FM



(a) FM Stereo Transmitter



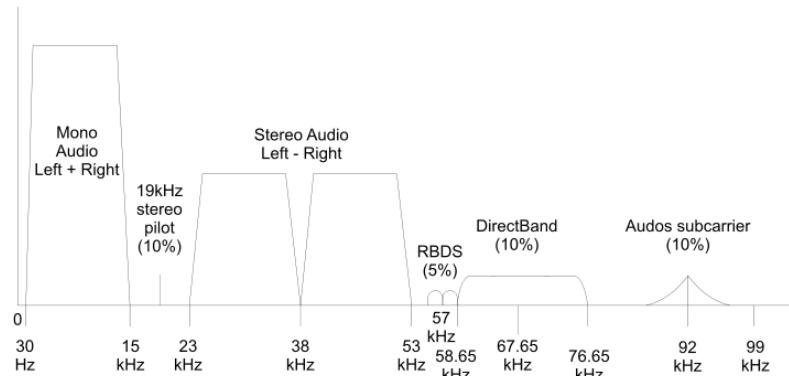
(b) Spectrum of Composite Baseband Signal



$$m_b(t) = [m_L(t) + m_R(t)] + [m_L(t) - m_R(t)] \cos(2\pi f_{SC}t) + k \cos[2\pi(f_{SC}/2)t]$$

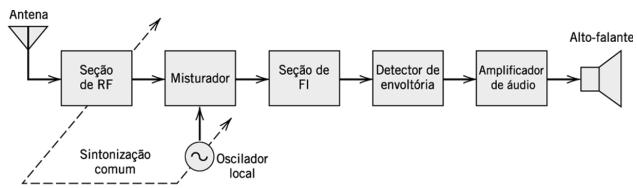
Notes

Multiplexação Estereofônica de FM



Notes

Receptor Super-heteródino

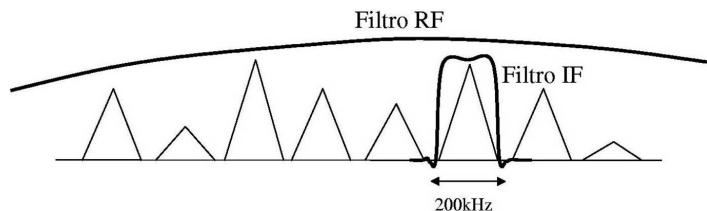


	Rádio AM	Rádio FM
Banda da Portadora de RF	0,535 – 1,605 MHz	88 – 108 MHz ¹
Frequência Intermediária, f_{FI}	0,455 MHz	10,7 MHz
Largura de Banda de FI	10 kHz	200 kHz

¹Com a digitalização da TV, a partir de 2017 a faixa de FM vai de 76 a 108 MHz sendo incluídos nesta faixa os antigos canais 5 e 6 de TV analógica (76 – 88 MHz).

Notes

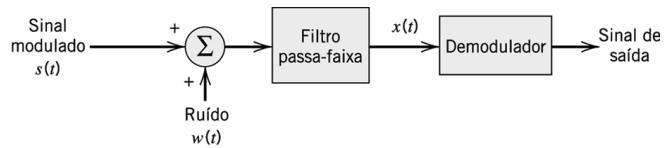
Seletividade



Notes

Modelo de Receptor Ruidoso

Notes



$w(t) \rightarrow$ processo de ruído branco com densidade espectral de potência $N_0/2$

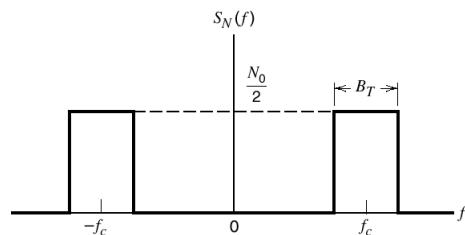
$N_0 \rightarrow$ potência de ruído média por unidade de largura de banda medida na entrada do receptor

$$x(t) = s(t) + n(t), \quad n(t) : \text{Ruído filtrado}$$

Evelio M. G. Fernández TE342 – Modulação de Onda Contínua

Característica Ideal do Ruído Filtrado

Notes



$$n(t) = n_I(t) \cos(2\pi f_c t) - n_Q(t) \sin(2\pi f_c t)$$

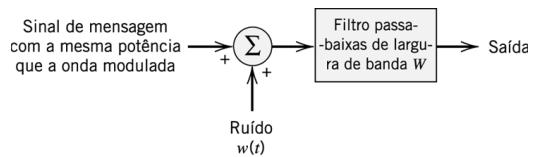
(SNR)_I: Razão entre a potência média do sinal modulado $s(t)$ e a potência média de ruído filtrado $n(t)$.

(SNR)_O: Relação sinal-ruído de saída (medida na saída do demodulador).

Evelio M. G. Fernández TE342 – Modulação de Onda Contínua

Modelo de Transmissão Banda Base

Notes



$(\text{SNR})_C$: Relação sinal-ruído de canal → Razão entre a potência média do sinal modulado $s(t)$ e a potência média de ruído de canal na largura de banda da mensagem, ambas medidas na entrada do receptor.

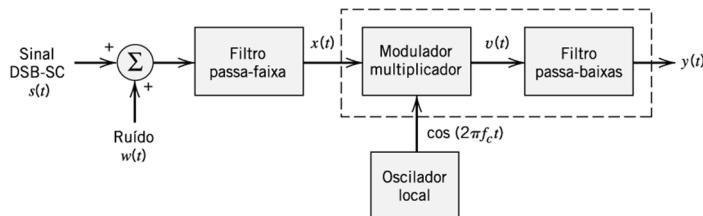
$$\text{Figura de Mérito} = \frac{(\text{SNR})_O}{(\text{SNR})_C}$$

Evelio M. G. Fernández

TE342 – Modulação de Onda Contínua

Receptor DSB-SC com Detecção Coerente

Notes



$$s(t) = C A_c \cos(2\pi f_c t) m(t),$$

$m(t) \rightarrow$ função amostra de um processo estacionário, $M(t)$, de média zero e largura de banda W Hz com potência média dada por,

$$P = \int_{-W}^W S_M(f) df$$

Evelio M. G. Fernández

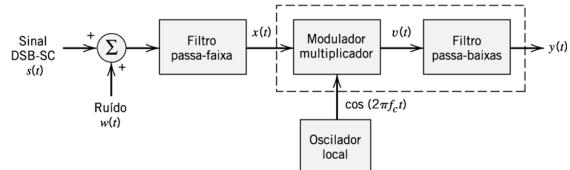
TE342 – Modulação de Onda Contínua

Relação sinal-ruído de canal:

$$s(t) = CA_c \cos(2\pi f_c t)m(t)$$

- Potência média de $s(t)$: $\rightarrow \frac{C^2 A_c^2}{2} P$,
- Potência média de ruído na largura de banda da mensagem:
 $\rightarrow WN_0$,

$$\Rightarrow (\text{SNR})_{\text{C,DSB-SC}} = \frac{C^2 A_c^2 P}{2WN_0}.$$



$$\begin{aligned} x(t) &= s(t) + n(t) \\ &= CA_c \cos(2\pi f_c t)m(t) + n_I(t) \cos(2\pi f_c t) - n_Q(t) \sin(2\pi f_c t) \end{aligned}$$

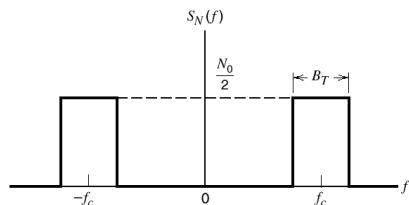
$$\begin{aligned} v(t) &= x(t) \cos(2\pi f_c t) \\ &= \frac{1}{2}CA_c m(t) + \frac{1}{2}n_I(t) + \frac{1}{2}[CA_c m(t) + n_I(t)] \cos(4\pi f_c t) - \frac{1}{2}n_Q(t) \sin(4\pi f_c t) \end{aligned}$$

$$y(t) = \frac{1}{2}CA_c m(t) + \frac{1}{2}n_I(t)$$

DSB-SC – Relação Sinal-Ruído de Saída

$$y(t) = \frac{1}{2} C A_c m(t) + \frac{1}{2} n_I(t)$$

- Potência média da componente de sinal em $y(t)$: $\rightarrow \frac{C^2 A_c^2 P}{4}$



- Potência média da componente de ruído em $y(t)$:

$$\rightarrow \left(\frac{1}{2}\right)^2 2WN_0 = \frac{1}{2}WN_0$$

$$\Rightarrow (\text{SNR})_{O, \text{DSB-SC}} = \frac{C^2 A_c^2 P / 4}{WN_0 / 2} = \frac{C^2 A_c^2 P}{2WN_0},$$

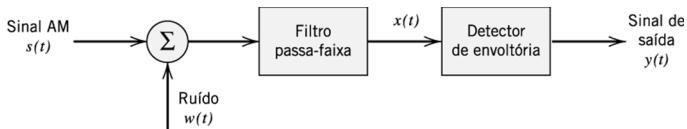
$$\text{Figura de Mérito} \rightarrow \left. \frac{(\text{SNR})_O}{(\text{SNR})_C} \right|_{\text{DSB-SC}} = 1.$$

Notes

Evelio M. G. Fernández

TE342 – Modulação de Onda Contínua

Modelo de um Receptor AM Ruidoso



$$s(t) = A_c [1 + k_a m(t)] \cos(2\pi f_c t)$$

- Potência média da componente de portadora: $A_c^2/2$,
- Potência média da componente que carrega a informação: $A_c^2 k_a^2 P/2$,
- Potência média do sinal AM: $A_c^2 (1 + k_a^2 P)/2$,
- Potência média de ruído na largura de banda da mensagem: WN_0 ,

$$\Rightarrow (\text{SNR})_{C, \text{AM}} = \frac{A_c^2 (1 + k_a^2 P)}{2WN_0}.$$

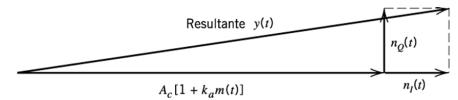
Notes

Evelio M. G. Fernández

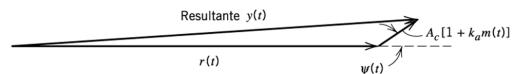
TE342 – Modulação de Onda Contínua

Diagrama Fasorial para Modulação AM

$$\begin{aligned}x(t) &= s(t) + n(t) \\&= [A_c + A_c k_a m(t) + n_I(t)] \cos(2\pi f_c t) - n_Q \sin(2\pi f_c t)\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}y(t) &= \{[A_c + A_c k_a m(t) + n_I(t)]^2 + n_Q^2(t)\}^{1/2} \\&\approx A_c + A_c k_a m(t) + n_I(t)\end{aligned}$$

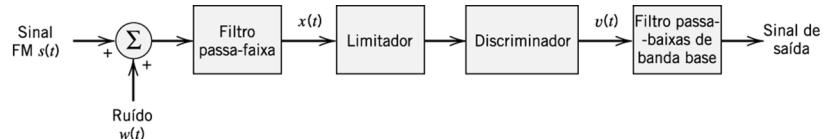


$$\begin{aligned}n(t) &= r(t) \cos[2\pi f_c t + \psi(t)] \\y(t) &\approx r(t) + A_c \cos[\psi(t)] + A_c k_a m(t) \cos[\psi(t)]\end{aligned}$$

Evelio M. G. Fernández

TE342 – Modulação de Onda Contínua

Modelo de um Receptor FM Ruidoso



$$\begin{aligned}s(t) &= A_c \cos \left[2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau \right] \\&= A_c \cos[2\pi f_c t + \phi(t)],\end{aligned}$$

onde $\phi(t) = 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau$.

$$\begin{aligned}n(t) &= n_I(t) \cos(2\pi f_c t) - n_Q(t) \sin(2\pi f_c t) \\&= r(t) \cos[(2\pi f_c t) + \psi(t)],\end{aligned}$$

onde $r(t) = \sqrt{n_I^2(t) + n_Q^2(t)}$ e $\psi(t) = \tan^{-1} \left[\frac{n_Q(t)}{n_I(t)} \right]$.

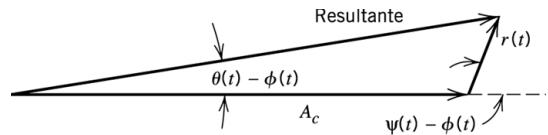
$$\begin{aligned}\Rightarrow x(t) &= s(t) + n(t) \\&= A_c \cos[2\pi f_c t + \phi(t)] + r(t) \cos[(2\pi f_c t) + \psi(t)].\end{aligned}$$

Notes

Notes

Diagrama Fasorial para Recepção FM

$$\begin{aligned}x(t) &= s(t) + n(t) \\&= A_c \cos[2\pi f_c t + \phi(t)] + r(t) \cos[(2\pi f_c t) + \psi(t)]\end{aligned}$$



$$\theta(t) = \phi(t) + \tan^{-1} \left\{ \frac{r(t) \sin[\psi(t) - \phi(t)]}{A_c + r(t) \cos[\psi(t) - \phi(t)]} \right\}$$

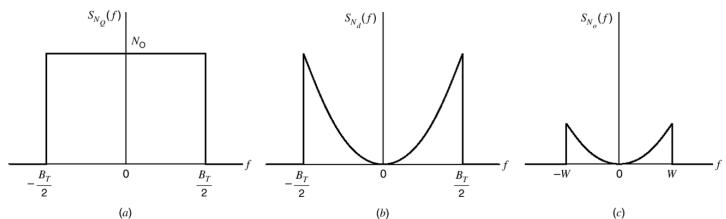
$$\begin{aligned}\theta(t) &\approx \phi(t) + \frac{r(t) \sin[\psi(t) - \phi(t)]}{A_c} \\&\approx 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau + \frac{r(t)}{A_c} \sin[\psi(t) - \phi(t)]\end{aligned}$$

Evelio M. G. Fernández

TE342 – Modulação de Onda Contínua

Notes

Análise do Ruído no Receptor FM



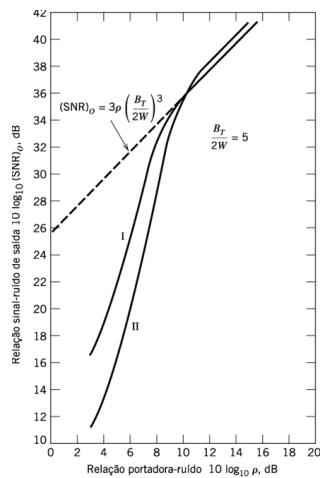
$$S_{N_d}(f) = \begin{cases} \frac{N_0 f^2}{A_c^2}, & |f| \leq \frac{B_T}{2} \\ 0, & \text{fora} \end{cases} \quad S_{N_0}(f) = \begin{cases} \frac{N_0 f^2}{A_c^2}, & |f| \leq W \\ 0, & \text{fora} \end{cases}$$

Notes

Evelio M. G. Fernández

TE342 – Modulação de Onda Contínua

Efeito Limiar



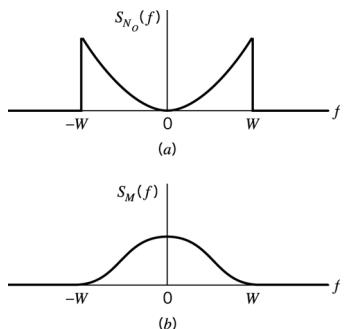
$$\rho = (\text{SNR})_I = \frac{A_c^2}{2B_T N_0}$$

Efeito limiar evitado desde que:

$$\rho \geq 20 \text{ ou } \rho \geq 13 \text{ dB}$$

Notes

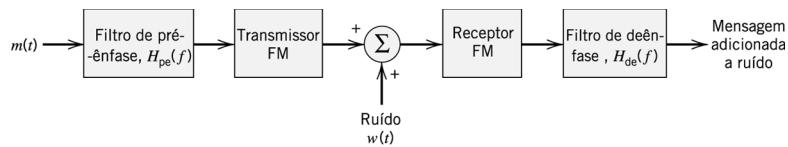
Efeito do Ruído em Sinais de Áudio



Notes

Pré-Ênfase e Deênfase em FM

Notes

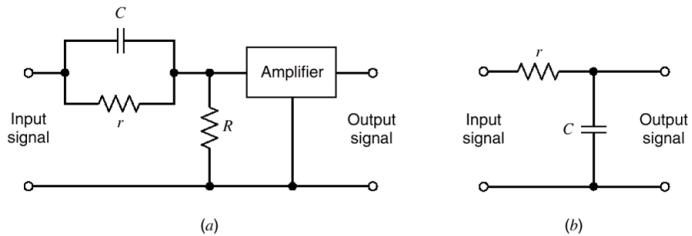


$$H_{de}(f) = \frac{1}{H_{pe}(f)}, \quad -W \leq f \leq W$$

Evelio M. G. Fernández TE342 – Modulação de Onda Contínua

Filtros de Pré-Ênfase e Deênfase

Notes



$$H_{pe} = 1 + \frac{jf}{f_0}$$

$$R \ll r \text{ e } 2\pi f C r \ll 1$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi r C}$$

$$H_{de}(f) = \frac{1}{1 + j f / f_0}$$

Evelio M. G. Fernández TE342 – Modulação de Onda Contínua

Exercício

A potência média de ruído por unidade de largura de banda medida na entrada de um receptor AM é 10^{-10} Watts/Hz. A onda modulante é senoidal, com uma potência de portadora de 80 kW, e uma potência de banda lateral de 10 kW por banda lateral. A largura de banda da mensagem é 4 kHz. No percurso até o receptor, o sinal transmitido é atenuado de 70 dB. Assumindo-se a utilização de um detector de envoltória no receptor, determine a relação sinal-ruído de saída do sistema. Por quantos decibéis esse sistema é inferior a um sistema com modulação DSB-SC?

Notes

Evelio M. G. Fernández TE342 – Modulação de Onda Contínua

Exercício

Um sinal de mensagem de amplitude normalizada tem 8 kHz de largura de banda e potência média 0,5 W. Deve-se transmitir este sinal através de um canal com 60 kHz de largura de banda disponível e atenuação de 40 dB. O canal é Gaussiano com $N_0/2 = 10^{-12}$ W/Hz. Será utilizado um esquema de modulação FM sem filtros de pré e deênfase.

- a) Determine a mínima potência a ser transmitida e o valor correspondente de coeficiente de desvio de frequência para se obter uma SNR de no mínimo 60 dB na saída do discriminador de frequências.
- b) Como se alteram os resultados da parte a) se forem usados filtros de pré e deênfase com constante de tempo igual a 75 μ s?

Notes

Evelio M. G. Fernández TE342 – Modulação de Onda Contínua