

TE060 – Princípios de Comunicação
Sistemas de Modulação de Onda Contínua

Evelio M. G. Fernández

9 de setembro de 2014

Notes

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.

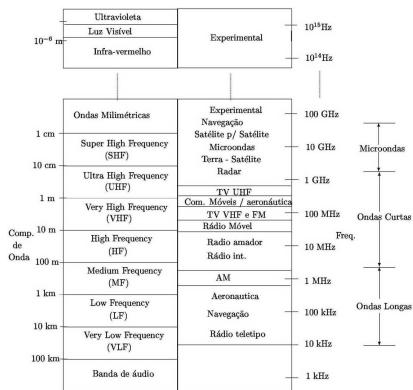
Notes

Por quê modular?

- Facilidade de irradiação
- Redução de ruído e interferências
- Para designação de frequências
- Multiplexação
- Para superar problemas de engenharia

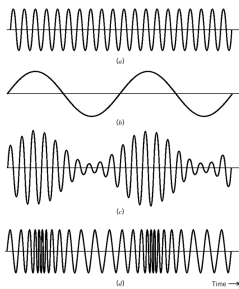
Notes

Uso do Espectro de Radiofrequências



Notes

Ilustração de Sinais AM e FM



Notes

Processo de Modulação de Amplitude

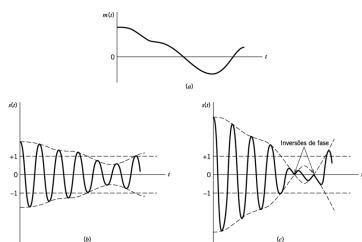


Ilustração do processo de modulação em amplitude. (a) Sinal de Banda base $m(t)$. (b) Onda AM para $k_a m(t) < 1$ para todo t . (c) Onda AM para $k_a m(t) > 1$ para algum t .

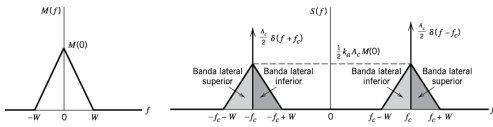
Notes

- 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:

- 1 $|k_a m(t)| < 1$ para todo t
- 2 $f_c \gg W$

Modulação AM no Domínio da Frequência



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

Notes

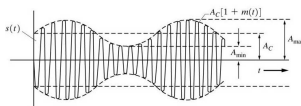
Exemplo: Modulação por um único tom senoidal

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

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



(a) Simusoidal Modulating Wave



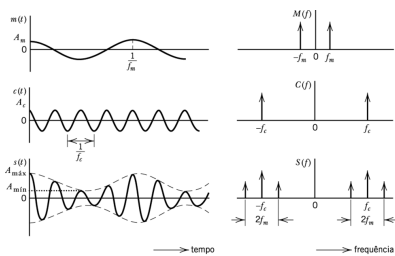
(b) Resulting AM Signal

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

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

Notes

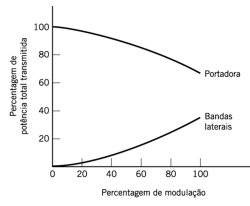
Exemplo: Modulação por um único tom senoidal



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

Notes

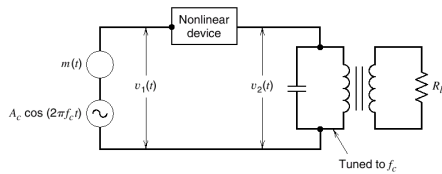
Eficiência de Potência AM



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

Notes

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



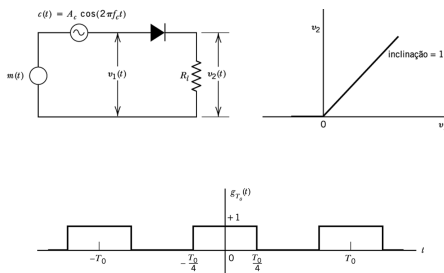
$$v_2(t) = a_1 v_1(t) + a_2 v_1^2(t)$$

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

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

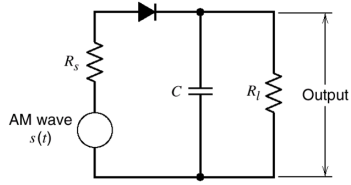
Notes

Modulador de Chaveamento



Notes

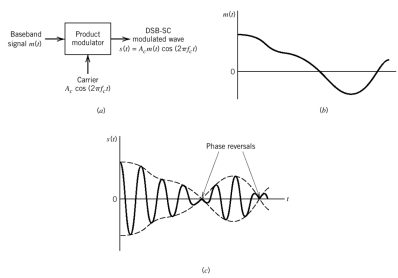
Detector de Envoltória



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

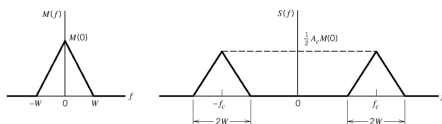
Notes

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



Notes

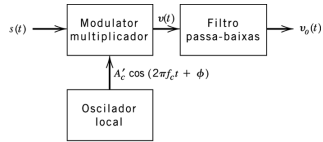
Espectro da Modulação AM DSB-SC



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

Notes

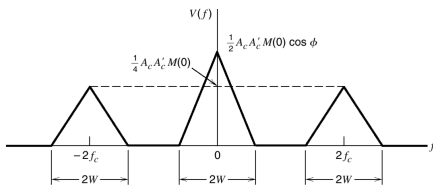
Detecção Coerente



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

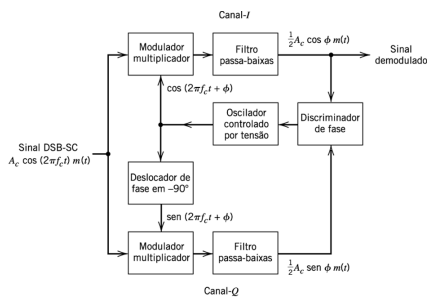
Notes

Saída do Modulador Produto no domínio da Frequência



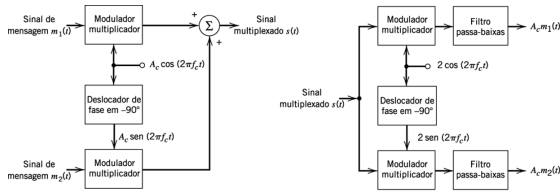
Notes

Receptor Costas



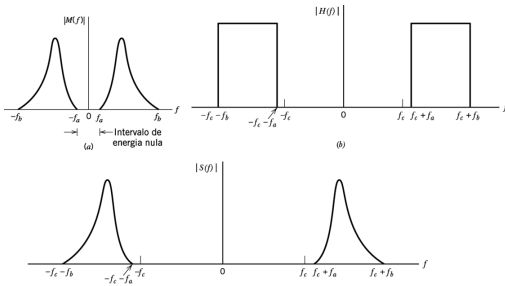
Notes

Modulação de Amplitude em Quadratura (QAM)



Notes

Modulação de Banda Lateral Única (SSB)



Notes

Exemplo: Problema 2.16 – Haykin

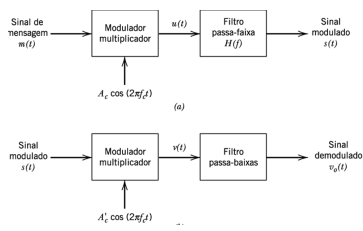
Usando a definição da transformada de Hilbert, mostre que um sinal modulado em banda lateral única resultante do sinal de mensagem $m(t)$ e da portadora $\cos(2\pi f_c t)$ de amplitude unitária é dado por:

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

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

Notes

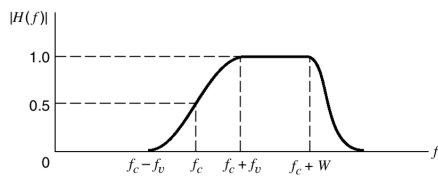
Modulação AM-VSB



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

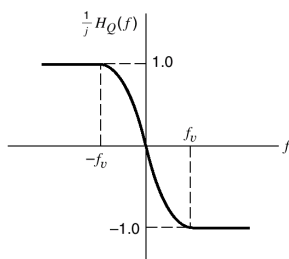
Notes

Resposta em Amplitude do Filtro VSB



Notes

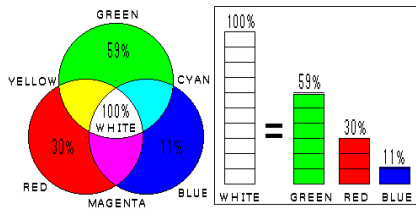
Resposta de Frequência do Filtro para Produzir a Componente em Quadratura



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

Notes

Exemplo: TV Analógica - Sinal de Vídeo Composto



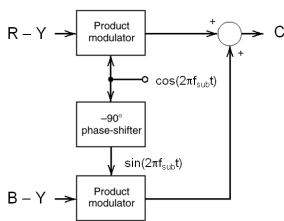
$$Y = 0,3E_R + 0,59E_G + 0,11E_B$$

$$R - Y = 0,7E_R - 0,59E_G - 0,11E_B$$

$$B - Y = 0,89E_B - 0,59E_G - 0,3E_R$$

Notes

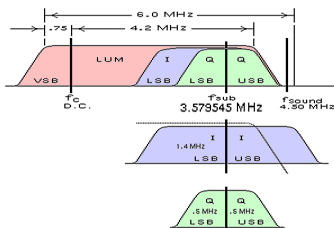
Sinal de Crominância



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

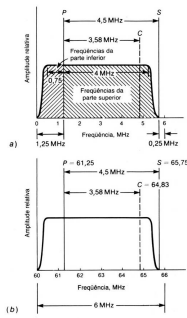
Notes

Espectro NTSC



Notes

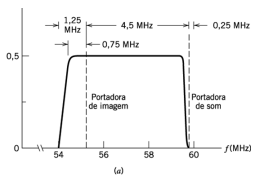
Ocupação da Banda por um Canal de TV de 6 MHz



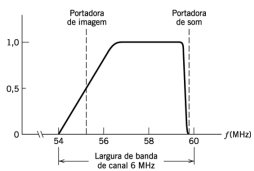
Evelio M. G. Fernández TE060 – Modulação de Onda Contínua

Notes

Resposta de Amplitude do Filtro VSB



(a) Espectro de magnitude idealizado de um sinal de TV transmitido

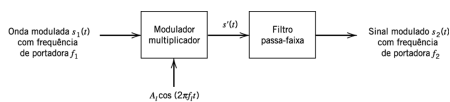


(b) Resposta em magnitude do filtro de conformação VSB no receptor

Evelio M. G. Fernández TE060 – Modulação de Onda Contínua

Notes

Translação de Frequência

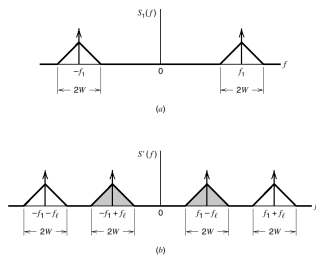


$$\begin{aligned}
 s'(t) &= s_1(t) \times A_1 \cos(2\pi f_1 t) \\
 &= m(t) \cos(2\pi f_1 t) \times A_1 \cos(2\pi f_1 t) \\
 &= \frac{1}{2} A_1 m(t) [\cos(2\pi(f_1 + f_1)t) + \cos(2\pi(f_1 - f_1)t)]
 \end{aligned}$$

Evelio M. G. Fernández TE060 – Modulação de Onda Contínua

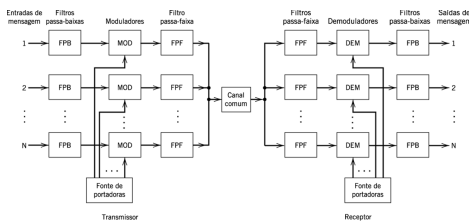
Notes

Espectro dos Sinais na Entrada e na Saída do Multiplicador



Notes

Diagrama em Blocos de um Sistema FDM



Notes

Modulação Angular

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

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

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

\Rightarrow **Frequência instantânea** do sinal com modulação angular:

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

Notes

Modulação de Fase e Modulação de Frequência

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

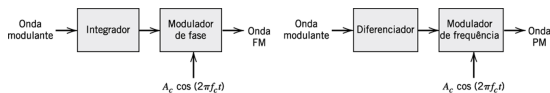
$$\theta_i(t) = 2\pi f_c t + k_p m(t) \implies s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + k_p m(t)],$$

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 $m(t)$:

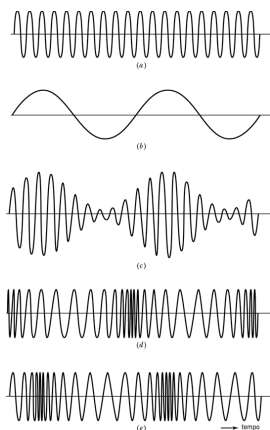
$$f_i(t) = f_c + k_f m(t) \implies s(t) = A_c \cos \left[2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau \right],$$

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



Notes

Ilustração de Sinais AM, PM e FM



Notes

Propriedades das Ondas com Modulação Angular

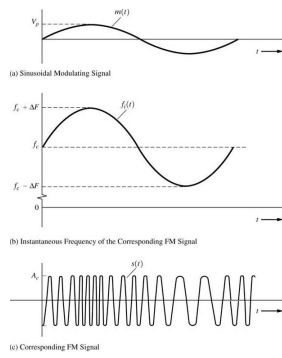
- 1 Constância da Potência Transmitida

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

- 2 Não linearidade 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

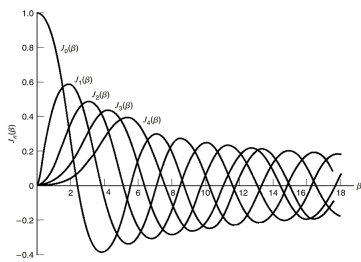
Modulação FM por um Único Tom Senoidal



Notes

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

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



Notes

Algumas Propriedades de $J_n(\beta)$

- 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,

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

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

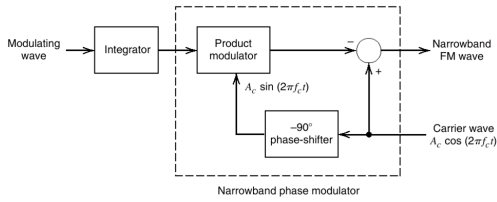
- $$\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(\beta) = 1$$

Notes

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

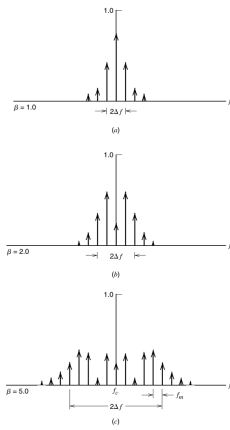
$$s(t) \approx A_c \{J_{-1}(\beta) \cos[2\pi(f_c - f_m)t] + J_0(\beta) \cos(2\pi f_c t) + J_1(\beta) \cos[2\pi(f_c + f_m)t]\}$$

$$= A_c \cos(2\pi f_c t) - \beta A_c \sin(2\pi f_c t) \sin(2\pi f_m t)$$



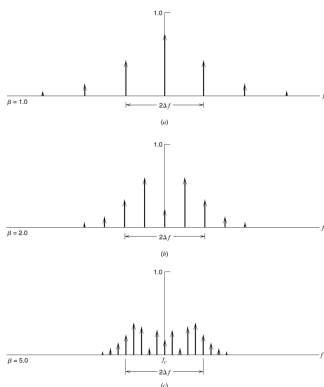
Notes

Modulação FM com sinal modulador de frequência fixa e amplitude variável



Notes

Modulação FM com sinal modulador de amplitude fixa e frequência variável



Notes

Estimação da Largura de Banda de um Sinal FM

- **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

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

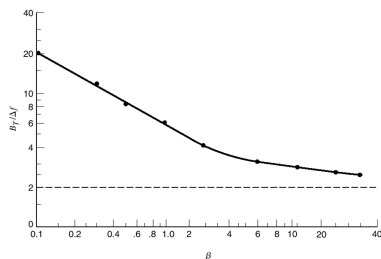
Notes

Frequências Laterais Significativas de um Sinal FM

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

Notes

Curva Universal



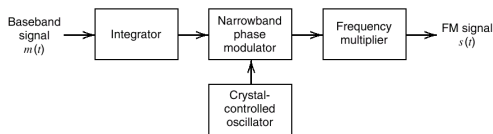
Notes

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

Geração Indireta de um Sinal FM Banda Larga



Notes

Multiplicador de Frequências



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

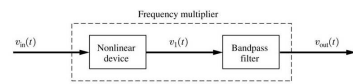
onde,

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

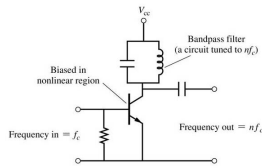
$n \rightarrow$ ordem de não linearidade mais elevada.

Notes

Multiplicador de Frequências



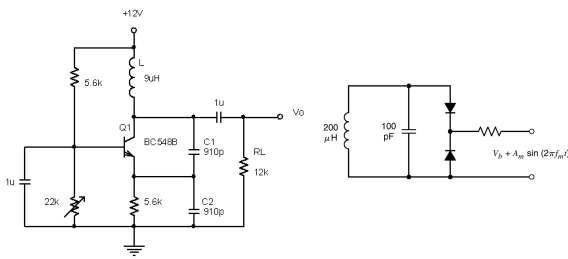
(a) Block Diagram of a Frequency Multiplier



(b) Circuit Diagram of a Frequency Multiplier

Notes

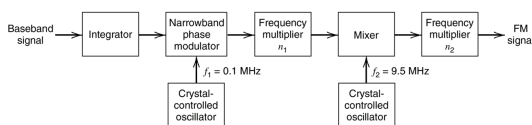
Geração FM de Banda Estreita



Notes

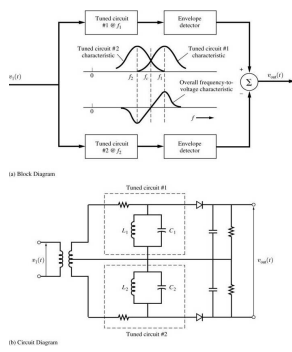
Geração Indireta de um Sinal FM de Banda Larga

Método Armstrong (Prob. 2.37 – Haykin)



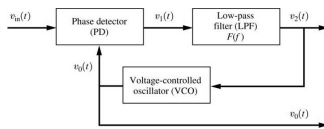
Notes

Discriminador de Frequências



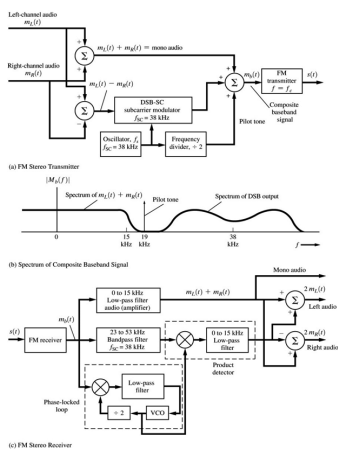
Notes

Demodulação por PLL



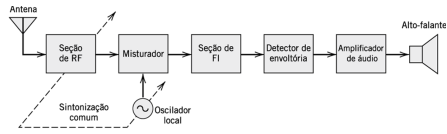
Notes

Multiplexação Estereofônica de FM



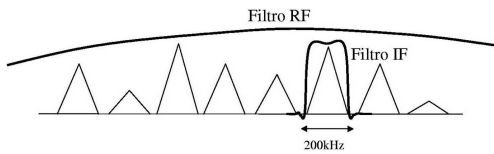
Notes

Receptor Super-heteródino



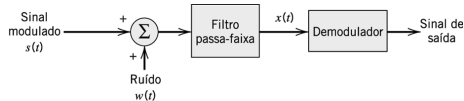
Notes

Seletividade



Notes

Modelo de Receptor Ruidoso



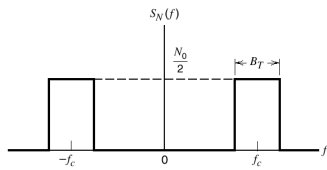
$w(t) \rightarrow$ processo de ruído branco com densidade espectral de potência $N_0/2$

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

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

Notes

Característica Ideal do Ruído Filtrado



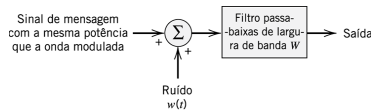
$$n(t) = n_I(t) \cos(2\pi f_c t) - n_Q(t) \sin(2\pi f_c t)$$

$(SNR)_I$: 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).

Notes

Modelo de Transmissão Banda Base

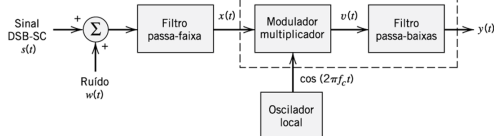


$(SNR)_C$: Relação sinal-ruído de canal \rightarrow Razão entre a potência média do sinal modulado $s(t)$ e a potência média de ruído de canal na largura de banda da mensagem, ambas medidas na entrada do receptor.

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

Notes

Receptor DSB-SC com Detecção Coerente



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

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

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

Notes

Modelo de um Receptor AM Ruidoso



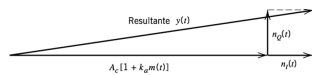
$$s(t) = A_c[1 + k_a m(t)] \cos(2\pi f_c t)$$

- 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 do ruído na largura de banda da mensagem: WN_0 ,
- $$\Rightarrow (SNR)_{C,AM} = \frac{A_c^2(1 + k_a^2 P)}{2WN_0}$$

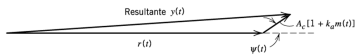
Notes

Diagrama Fasorial para Modulação AM

$$x(t) = s(t) + n(t) = [A_c + A_c k_a m(t) + n_I(t)] \cos(2\pi f_c t) - n_Q(t) \sin(2\pi f_c t)$$



$$y(t) = \left\{ [A_c + A_c k_a m(t) + n_I(t)]^2 + n_Q^2(t) \right\}^{1/2} \approx A_c + A_c k_a m(t) + n_I(t)$$

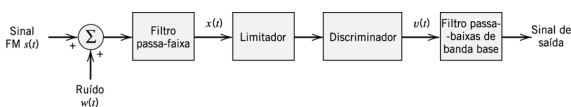


$$n(t) = r(t) \cos[2\pi f_c t + \psi(t)]$$

$$y(t) \approx r(t) + A_c \cos[\psi(t)] + A_c k_a m(t) \cos[\psi(t)]$$

Notes

Modelo de um Receptor FM Ruidoso



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

$$= A_c \cos[2\pi f_c t + \phi(t)],$$

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

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

$$= r(t) \cos[(2\pi f_c t) + \psi(t)]$$

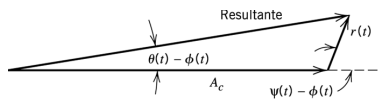
$$x(t) = s(t) + n(t)$$

$$= A_c \cos[2\pi f_c t + \phi(t)] + r(t) \cos[(2\pi f_c t) + \psi(t)]$$

Notes

Diagrama Fasorial para Recepção FM

$$x(t) = s(t) + n(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + \phi(t)] + r(t) \cos[(2\pi f_c t) + \psi(t)]$$

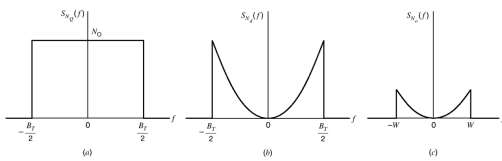


$$\theta(t) = \phi(t) + \tan^{-1} \left\{ \frac{r(t) \sin[\psi(t) - \phi(t)]}{A_c + r(t) \cos[\psi(t) - \phi(t)]} \right\}$$

$$\theta(t) \approx \phi(t) + \frac{r(t) \sin[\psi(t) - \phi(t)]}{A_c}$$

Notes

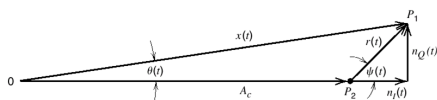
Análise do Ruído no Receptor FM



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

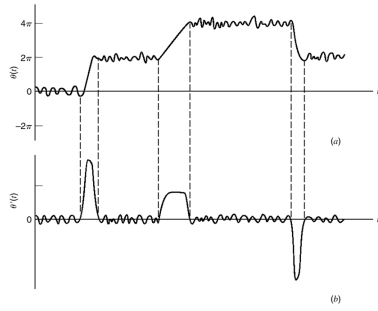
Notes

Diagrama Fasorial – Portadora sem Modular



Notes

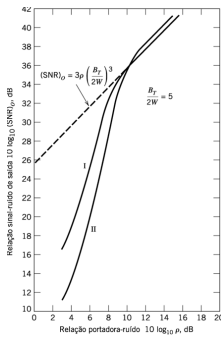
Efeito de SNR baixa no Receptor



Evelio M. G. Fernández TE060 – Modulação de Onda Contínua

Notes

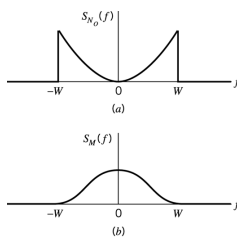
Efeito Limiar



Evelio M. G. Fernández TE060 – Modulação de Onda Contínua

Notes

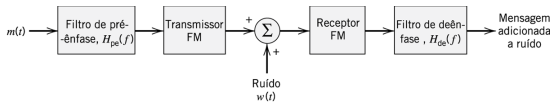
Efeito do Ruído em Sinais de Áudio



Evelio M. G. Fernández TE060 – Modulação de Onda Contínua

Notes

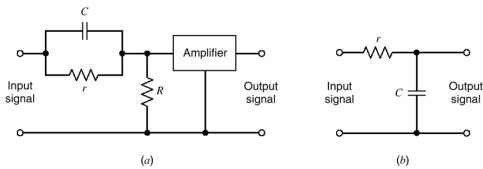
Pré-Ênfase e Deênfase em FM



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

Notes

Filtros de Pré-Ênfase e Deênfase



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

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

$$f_0 = \frac{1}{2\pi rC}$$

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

Notes

Exercício

A potência média de ruído por unidade de largura de banda medida na entrada de um receptor AM é 10^{-3} 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. 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 de modulação DSB-SC?

Notes

Exercício

Um sinal de mensagem de amplitude normalizada tem 8 kHz de largura de banda e potência média 0.5 kW. 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

Notes

Notes
