Modulações analógicas

Comunicações I

Thadeu L. B. Dias

UFRJ

ToC

Intro

Propósito

Transmitir um sinal que contém informação através de um canal.

Os sinais que contém a informação a ser transmitida também são denominados *banda base*.

Banda base aqui se refere a região do espectro que o sinal ocupa como fornecida pela fonte da informação.

Frequentemente, o canal apenas viabiliza transmissão em uma faixa de espectro que não é a mesma da fonte de informação, portanto precisamos *adaptar* o sinal banda base para a região adequada.

Modulação

Modulação, rigorosamente, se refere ao processo de se alterar alguma característica de um sinal base, a *portadora*, de acordo com um algum sinal *modulante*.
O processo reverso, de se recuperar o sinal modulante a partir do sinal modulado, naturalmente é a *demodulação*.

CW

Modulação em onda contínua

Uma das portadoras mais comuns é a (cos)senóide, caracterizada por amplitude A_c, frequência f_c e fase ϕ_c:

$$c(t) = A_c \cos(2\pi f_c + \phi_c). \tag{1}$$

Técnicas de modulação diferentes afetam diferentes parâmetros da portadora:

- Amplitude: AM (*Amplitude Modulation*)
- Frequência: FM (*Frequency Modulation*)
- Fase: PM (*Phase Modulation*)

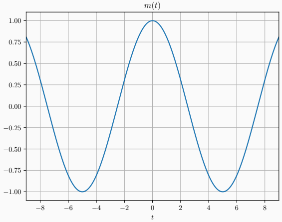
Modulação em amplitude, Double sideband — Supressed Carrier

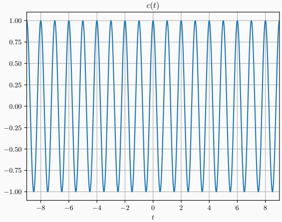
A modulação mais simples é a modulação em *amplitude*. No caso, os sinais modulantes e a portadora são multiplicados. Sem perder generalidade, considerando $\phi_c = 0$, um sinal AM básico tem a seguinte forma:

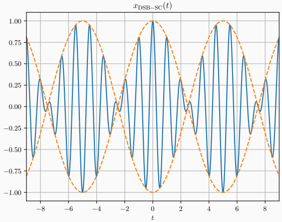
$$x_{\mathrm{DSB-SC}}(t) = A_c m(t)\cos(2\pi f_c). \qquad (2)$$

O dispositivo eletrônico que realiza o produto entre dois sinais, frequentemente é chamado de *mixer*.

Forma do sinal DSB-SC







Demodulação DSB-SC

O processo de demodulação não é muito útil se não pudermos recuperar o sinal modulante.

Felizmente, para o caso DSB-SC, o demodulador consiste também de um mixer multiplicando por uma senóide *sincronizada* com a portadora.

Observe:

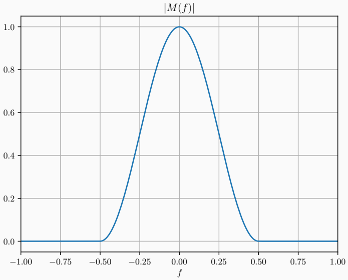
$$\begin{aligned} x(t)\cos(2\pi f_c) &= A_c m(t)\cos(2\pi f_c)\cos(2\pi f_c) \\ &= A_c m(t)\left[\frac{1}{2}\left(1+\cos(4\pi f_c)\right)\right] \end{aligned}$$

O resultado possui uma componente $\frac{A_c}{2}m(t)$ e uma componente $\frac{A_c}{2}m(t)\cos(4\pi f_c)$. Se f_c for escolhido de forma que $f_c \gg W_m$, onde W_m é a maior frequência ocupada pelo sinal modulante, então um filtro *passa-baixas* é suficiente para se recuperar $m(t)$.

DSB e SC

De onde vem os termos DSB e SC? A resposta vem da análise espectral de um sinal gerado por esse tipo de modulação.

Suponha que se deseja transmitir um sinal com o seguinte espectro:



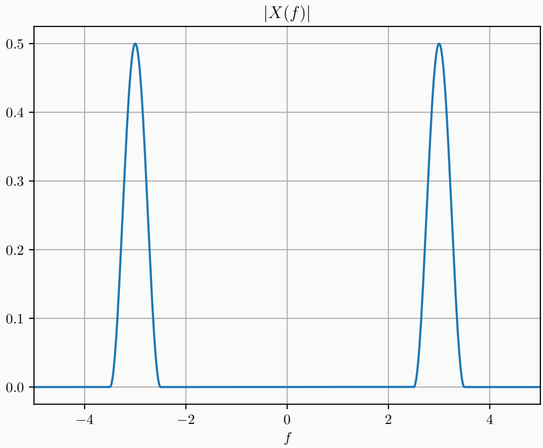
Como se comporta então $x(t)$?

Sabemos que o produto no tempo equivale a convolução na frequência. Como a portadora é um cosseno, temos

$$\begin{aligned} X(f) &= M(f) * C(f) \\ &= M(f) * \frac{1}{2}(\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)) \\ &= \frac{1}{2}(M(f - f_c) + M(f + f_c)). \end{aligned}$$

Visualmente, qual o formato disso?

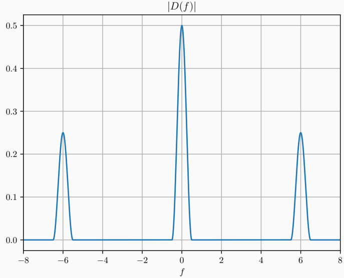
Formato do espectro DSB-SC



1. Largura de banda ocupada “dobra” — DSB
2. Impulsos da portadora “somem” — SC

Revisitando: Demodulação DSB-SC

$$
\begin{aligned}
X(f) * C(f) &= X(f) * \frac{1}{2}(\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)) \\
&= \frac{1}{4}(M(f - 2f_c) + M(f + 2f_c) + 2M(f)).
\end{aligned}
$$

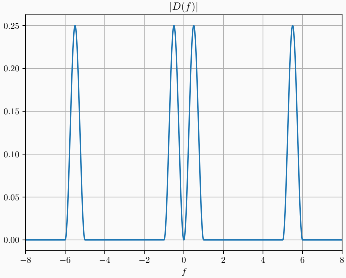


Pergunta: Qual o efeito de uma portadora mal sincronizada?

Dessincronismo: Demodulação DSB-SC

Desvio de frequência:

$$\begin{aligned} X(f) * C'(f) &= X(f) * \frac{1}{2}(\delta(f - f') + \delta(f + f')) \\ &= \frac{1}{4}(M(f - f_c + f') + M(f + f_c - f') + \ldots) \end{aligned}$$



Sinal original não é recuperado por um passa-baixas!

Ex. 1 — Desvio de fase

Suponha que na demodulação, a frequência do oscilador local está correta, porém sua fase é desviada por um fator $-\pi \leq \phi' < \pi$ relativo à portadora de transmissão. Qual equação descreve o sinal recuperado?

Multiplicando $x(t)$ pelo oscilador local:

$$\begin{aligned}\hat{m}(t) &= \cos(2\pi f_c + \phi')x(t) \\ &= A_c m(t)\cos(2\pi f_c)\cos(2\pi f_c + \phi') \\ &= \frac{A_c}{2} m(t)[\cos(4\pi f_c + \phi') + \cos(\phi')]\end{aligned}$$

Com $\phi' = \frac{\pi}{2}$ o sinal é totalmente suprimido.

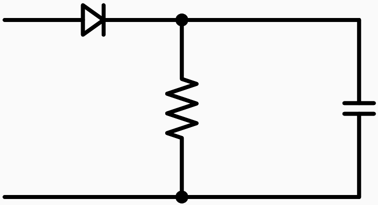
Solução?

Soluções possíveis?

- Circuito de sincronismo — Era dos circuitos integrados
- Detector de envoltória — Era discreta

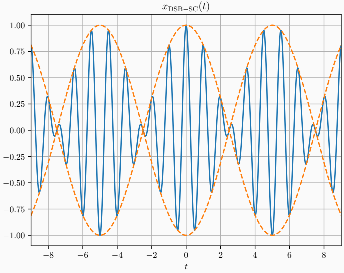
Detector de envoltória

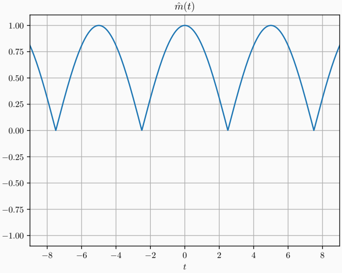
Detector de envoltória básico, aproxima o ‘sample and hold’ nos picos da onda de entrada:



Como esse detector se comporta no DSB-SC?

Envoltória do DSB-SC





Onde ocorreu o problema?

Como evitar o 'phase shift'

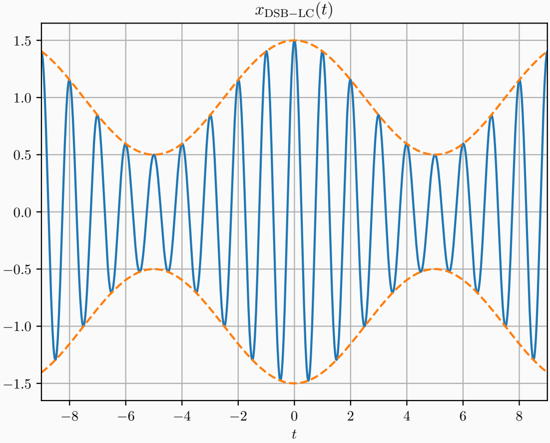
O problema da envoltória ocorre quando $m(t) < 0$. Podemos então adicionar um "offset" em $m(t)$:

$$m'(t) = 1 + k_a m(t), \tag{3}$$

escolhendo k_a de forma que $|k_a m(t)| < 1$.
Qual o sinal resultante se modularmos $m'(t)$ agora?

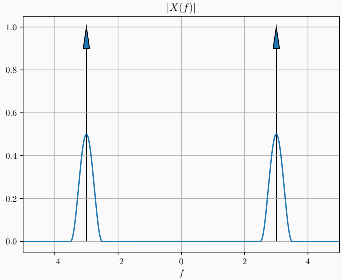
DSB-LC

$$x_{\mathrm{DSB-LC}}(t) = A_c(1 + k_a m(t))\cos(2\pi f_c), \tag{4}$$



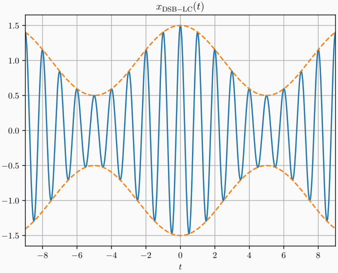
Formato do espectro DSB-LC

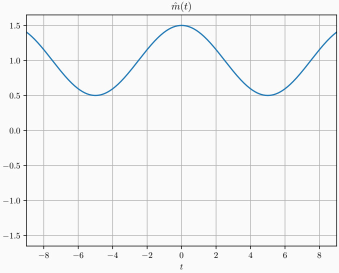
$$
\begin{aligned}
X(f) &= M(f) * C(f) \\
&= (1 + k_a M(f)) * \frac{1}{2}(\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)) \\
&= \frac{1}{2}(k_a M(f - f_c) + k_a M(f + f_c) + \delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)).
\end{aligned}
$$



1. Contém impulsos da portadora — LC

Detecção do DSB-LC





Evitamos a distorçao! Mas qual foi o custo?