

## COMUNICACIONES - AÑO 2015

### Práctica 3: Sistemas de Modulación Lineal. Recepción Heterodina. Distorsión Lineal.

#### 1. Modulación con señales determinísticas.

Considere que la señal  $m(t)$  es modulada sobre una portadora de 1kHz. En cada caso, dé una expresión para la señal modulada  $x(t)$ , grafique esquemáticamente su forma temporal, calcule su transformada de Fourier y obtenga su densidad espectral de potencia o energía según corresponda.

- Modulación DBL-PS y  $m(t) = \cos(2\pi 100t)$ .
- Modulación DBL-PS y  $m(t) = \text{sinc}(100t)$ .
- Modulación AM con  $a = 0,5$  y  $m(t) = \cos(2\pi 100t)$ .
- Modulación AM con  $a = 1$  y  $m(t) = \text{sinc}(100t)$ .
- Modulación AM con  $a = 1,5$  y  $m(t) = \text{sen}(2\pi 100t)$ .
- Modulación BLU-S y  $m(t) = \cos(2\pi 100t)$ .
- Modulación BLU-I y  $m(t) = \text{sinc}(100t)$ .

#### 2. Modulación con señales aleatorias.

Considere un PAESA  $M(t)$  con distribución de amplitudes uniforme entre -1 y 1, y DEP  $S_{MM}(f)$  nula si  $|f| > W$ . Se modula  $M(t)$  de manera lineal con frecuencia de portadora  $f_p \gg W$ . En todos los casos considere  $\Theta \sim \mathcal{U}[0, 2\pi]$  e independiente de  $M(t)$ .

- La modulación es DBL-PS con  $X(t) = AM(t) \cos(2\pi f_p t + \Theta)$ . Calcule  $S_{XX}(f)$  y la potencia del proceso. ¿Es  $X(t)$  PAESA? ¿Cómo debe demodularse  $X(t)$  para recuperar  $M(t)$ ?
- La modulación es AM con  $X(t) = A(1 + aM_n(t)) \cos(2\pi f_p t + \Theta)$ . Expresar a  $M_n(t)$  en función de  $M(t)$ . Calcule  $S_{XX}(f)$ . ¿Es  $X(t)$  PAESA? Calcule la eficiencia en el uso de la potencia de la señal modulada. ¿Cómo puede demodularse  $X(t)$  para recuperar  $M(t)$  si  $a < 1$ ? ¿Y si  $a > 1$ ? ¿En qué caso es necesario que el receptor conozca el valor que tomó  $\Theta$ ?
- Si  $\hat{M}(t)$  es la transformada de Hilbert de  $M(t)$ , calcule  $S_{\hat{M}\hat{M}}(f)$  y  $S_{M\hat{M}}(f)$ . ¿Es  $\hat{M}(t)$  PAESA?
- Se modula  $M(t)$  en BLU superior obteniéndose  $X(t) = AM(t) \cos(2\pi f_p t + \Theta) - A\hat{M}(t) \text{sen}(2\pi f_p t + \Theta)$ . Obtenga  $S_{XX}(f)$ . ¿Es  $X(t)$  PAESA? ¿Cómo debe demodularse  $X(t)$  para recuperar  $M(t)$ ?

#### 3. Detección coherente con errores.

La señal  $m(t)$  se modula en DBL-PS obteniéndose  $x(t) = m(t) \cos(2\pi f_p t)$ . El receptor realiza una demodulación coherente utilizando como referencia la portadora  $\cos(2\pi f_p t + \theta(t))$ .

- Halle una expresión para la señal demodulada si  $\theta(t) = \theta_0$ . ¿Cuál es el valor máximo del error de fase para que la pérdida de potencia no sea mayor que 1dB?
- Obtenga la señal demodulada cuando hay un error de frecuencia  $\Delta f$ , es decir  $\theta(t) = \Delta f t$ .
- Calcule la pérdida de potencia promedio en la demodulación si  $\theta(t) \sim \mathcal{U}[-\pi/10, \pi/10]$ .
- Obtenga la señal demodulada si se transmitió en BLU ( $x(t) = m(t) \cos(2\pi f_p t) \pm \hat{m}(t) \text{sen}(2\pi f_p t)$ ).
- Muestre que si  $m(t)$  es una señal de potencia  $x^2(t)$  tiene una componente de frecuencia en  $2f_p$ . A partir de esta señal es posible recuperar la portadora en el receptor.
- Compruebe que el método de recuperación de portadora anterior no sirve para señales de BLU.

#### 4. MODulando y DEModulando con Matlab.

- a) Tome muestras de una señal de voz  $m(t)$  y guárdelas en un archivo *wav*. Para ello puede utilizar cualquier programa de audio o el *Data Acquisition Toolbox* de Matlab. Otra opción es bajar el archivo de sonido de la página web de la cátedra.
- b) Grafique y escuche  $m(t)$ . Obtenga y grafique una estimación de su DEP usando la función `pwelch`. Para ello puede guiarse por las siguientes sentencias:

```
clear all;close all;
% Señal moduladora
[m,fm]=wavread('speech_dft.wav');
m=interp(m,10); % Aumento la tasa de muestreo 10 veces ¿Para qué?
N=length(m); t=0:1/(10*fm):(N-1)/(10*fm);
figure(1); plot(t,m); xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('m(t)'); title('Señal Moduladora')
% Estimación de DEP
[Smm,f]=pwelch(m,ones(1,1000),0,[],10*fm,'twosided');% Con FFT's de largo 1000
figure(2); plot(fftshift(mod(f+5*fm,10*fm)-5*fm),fftshift(Smm))
xlabel('Frecuencia [Hz]'); title('Densidad Espectral de Potencia Estimada')
ejes=axis; axis([-5*fm 5*fm ejes(3:4)])
figure(3); plot(fftshift(mod(f+5*fm,10*fm)-5*fm),10*log10(fftshift(Smm)))
xlabel('Frecuencia [Hz]'); title('Densidad Espectral de Potencia Estimada en dB')
ejes=axis; axis([-5*fm 5*fm ejes(3:4)])
```

- c) Calcule la potencia media normalizada  $P_m$  del mensaje.
- d) Module con la señal  $m(t)$  en DBL-PS, utilizando valores de frecuencia y fase en la portadora, generados en forma aleatoria. Grafique la señal modulada  $x_c(t)$  y su DEP estimada usando `pwelch`. Puede guiarse por las siguientes sentencias:

```
% Modulando en DBL-PS
fc= fix(fm*rand + fm); % Frecuencia de la portadora [Hz]
tita=2*pi*rand; % Fase de portadora
Ac= 10; % amplitud de la portadora
rand('state',sum(100*clock));
xc=Ac.*m.*cos(2*pi*fc.*t.'+tita);
figure(4); plot(t,xc); xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('x_c(t)')
title('Señal modulada en DBL-PS')
```

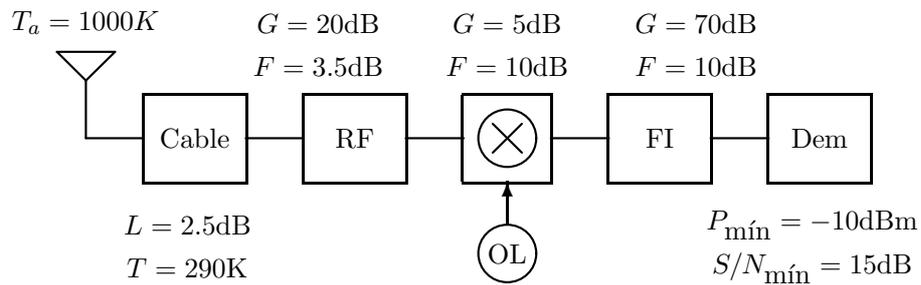
- e) Recupere la portadora y demodule coherentemente la señal. Puede usar las siguientes sentencias:

```
% Recuperación de Portadora
xxc=xc.^2; XXC=fft(xxc);
f=0:10*fm/N:(N-1)*10*fm/N;
[maxi,ind]=max(abs(XXC(10:length(XXC))));
fc_est=fix(f(ind)/2+1); fase=angle(XXC); tita_est=fase(ind)/2;
d=xc.*cos(2*pi*fc_est.*t.'+tita_est);% Demodulación
[Z,Y]=butter(15,0.2); yd=filter(Z,Y,d);
sound(yd,10*fm)
```

- f) Obtenga y escuche la señal obtenida al demodular con un error de fase de  $\pi/4$  rad. y  $\pi/2$  rad.
- g) Repita los pasos anteriores, pero cambiando el tipo de modulación a AM. Calcule la potencia de la portadora y del mensaje. Obtenga la eficiencia  $E_{ff}$  para este sistema de modulación. Demodule la señal de manera no coherente (por ejemplo, con un detector de envolvente utilizando la función `abs` y filtrando adecuadamente).
- h) Por último, module ahora en BLU y demodule. ¿Puede estimar la fase de la portadora transmitida a partir de la señal modulada recibida? Intente demodular con distintos valores de fase.

### 5. Receptor sensible.

Para recibir señales moduladas en AM con portadoras en la banda de 95 a 105 MHz y 90kHz de ancho de banda (en banda base) se utiliza el siguiente receptor. Considere adaptación entre todos los bloques.



- Especifique las frecuencias centrales y anchos de banda de los filtros, y las frecuencias de oscilador local, teniendo en cuenta el rechazo de las frecuencias imágenes y el ancho de banda de la señal. La FI debe elegirse entre 455kHz; 1,75MHz; 10,7MHz; 38,9MHz; 70MHz, y usar filtros con  $Q < 100$ .
- Teniendo en cuenta la potencia que requiere el demodulador, obtenga la mínima potencia de señal que es necesario recibir en la antena.
- Calcule la figura de ruido total y la temperatura de ruido equivalente del receptor.
- Calcule la potencia de ruido total equivalente a la entrada. Obtenga la mínima potencia de señal necesaria en la antena para tener la mínima relación señal a ruido que necesita el demodulador.
- Considerando los resultados de b) y d) determine la mínima potencia necesaria en antena para cumplir los dos requisitos (este valor es la *sensibilidad* del receptor).
- Obtenga un valor de la constante de tiempo del detector de envolvente empleado en el demodulador.

### 6. Receptores con Conversiones

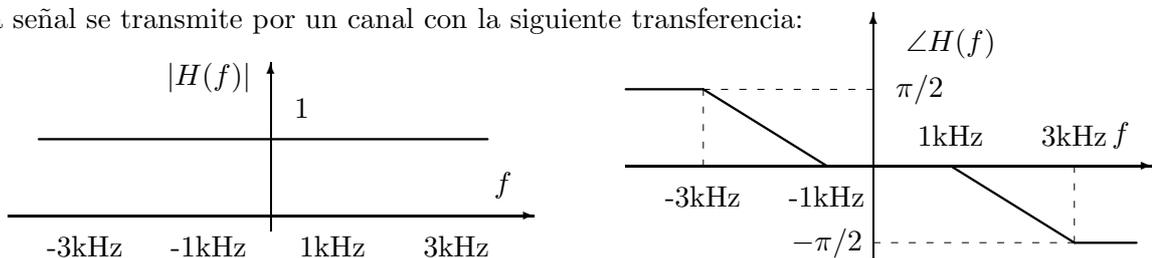
En cada uno de los dos casos siguientes diseñe un receptor sin utilizar filtros variables, indicando cuantas conversiones son necesarias de acuerdo a la selectividad necesaria y al rechazo de frecuencias imágenes. Utilice valores de frecuencias intermedias normalizados (455kHz; 1,75MHz; 10,7MHz; 38,9MHz; 70MHz), filtros pasa-banda, filtros pasa-bajos, osciladores fijos y variables (con una variación  $f_{\text{máx}}/f_{\text{mín}} < 2$ ). Recuerde que no es conveniente utilizar frecuencias intermedias que caigan en la banda que se desea recibir, ni en las cercanías de la frecuencia del oscilador local.

- El receptor es para canales modulados en DBL-PS con portadoras en la banda de 5 a 25 MHz y 40kHz de ancho de banda. Se deben utilizar filtros pasa-banda con  $Q < 100$ . Dibuje los espectros en cada punto del esquema del receptor si se supone que la señal recibida en banda base tiene una DEP triangular y la frecuencia de portadora es 15 MHz.
- El receptor es para señales de 10kHz de ancho de banda (en banda base) moduladas en BLU-I con frecuencia de portadora en 10MHz. Se deben utilizar filtros pasa-banda con  $Q < 10$ . ¿Qué debería modificar en el esquema del receptor para recibir la misma señal pero modulada en DBL-PS?

### 7. Distorsión Lineal con Tonos

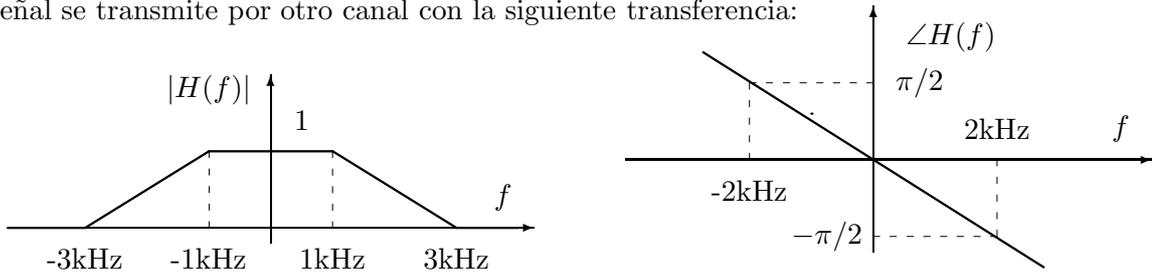
Considere una onda cuadrada con amplitud 1V, período 2ms, valor medio nulo y ciclo de trabajo 50%.

- Calcule su desarrollo en serie de Fourier y aproxime la señal tomando sus primeras cuatro componentes no nulas. Grafique la señal.
- Esta señal se transmite por un canal con la siguiente transferencia:



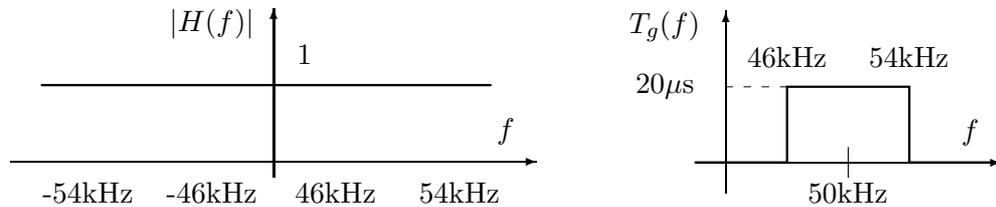
Obtenga la salida del canal usando la aproximación de a). ¿Hay distorsión lineal? ¿De qué tipo?

c) La señal se transmite por otro canal con la siguiente transferencia:



Obtenga la salida del canal usando la aproximación de a). ¿Hay distorsión lineal? ¿De qué tipo?

d) Se modula la señal en AM utilizando como frecuencia de portadora  $f_p = 50\text{kHz}$  e índice de modulación  $a = 0,8$ . La señal de AM se transmite por un canal que posee las siguientes características:



Obtenga la señal a la entrada y a la salida del canal usando la aproximación de a). ¿Se distorsiona la señal? ¿Se distorsiona la envolvente?

## 8. Canales LIT

Las siguientes transferencias corresponden a los modelos en banda base de dos canales de comunicaciones.

$$\tilde{H}_1(s) = \frac{s_1}{(s + s_1)}, \text{ con } s_1 = 2\pi 1\text{kHz}.$$

$$\tilde{H}_2(s) = \frac{-s_2(s - s_1)}{(s + s_1)(s + s_2)}, \text{ con } s_1 = 2\pi 1\text{kHz y } s_2 = 2\pi 20\text{kHz}.$$

Esto significa que si  $f_c$  es la frecuencia central del canal y  $\phi_c$  su fase a esta frecuencia, entonces su respuesta en frecuencia es  $H(f) = \frac{1}{2}\tilde{H}_1(f - f_c)e^{j\phi_c}$ , para  $f > 0$ . Para cada canal responda lo siguiente:

- ¿En qué ancho de banda puede usarse el canal sin tener distorsión de amplitud mayor a  $3\text{dB}$ ?
- Calcule el retardo de fase y el retardo de grupo del canal.
- Se transmite por el canal una señal modulada linealmente (DBL, AM o BLU) de banda suficientemente angosta como para considerar que no hay distorsión lineal. ¿Cuánto se retrasará en el canal la envolvente de la señal transmitida? ¿Cuál es aproximadamente el ancho de banda útil en este caso?
- En las condiciones del inciso anterior ¿importa el valor de la fase del canal en la frecuencia de portadora  $\phi_c$ ? ¿Qué sucede en la demodulación? Analice los casos: AM, DBL y BLU.

## Algunos resultados

5. a) Filtro RF:  $f_{RF} = 100\text{MHz}$  y  $\Delta f_{RF} = 10\text{MHz}$ .  $FI = 10,7\text{MHz}$ .  $105,7 \leq f_{OL} \leq 115,7\text{MHz}$ .  
 b)  $P_{A1} = -102,5\text{dBm}$ .  
 c)  $F = 6,2\text{dB}$  y  $T_e = 915,36\text{K}$   
 d)  $T_T = 1915,36\text{K}$  y  $P_{A2} = -98,2\text{dBm}$   
 e)  $P_A = 151\text{pW}$  o  $P_A = -98,2\text{dBm}$   
 f)  $\tau = RC = 1\mu\text{s}$  ( $0,1\mu\text{s} \ll \tau \ll 10\mu\text{s}$ ).

6. a) Doble Conversión.  
 Filtro RF:  $f_{RF} = 15\text{MHz}$  y  $\Delta f_{RF} = 20$  a  $30\text{MHz}$ .  $43,9 \leq f_{OL1} \leq 63,9\text{MHz}$ .  
 Filtro FI<sub>1</sub>:  $f_{FI1} = 38,9\text{MHz}$  y  $\Delta f_{FI1} = 3,4\text{MHz}$ .  $f_{OL2} = 37,15\text{MHz}$ .  
 Filtro FI<sub>2</sub>:  $f_{FI2} = 1,75\text{MHz}$  y  $\Delta f_{FI2} = 40\text{kHz}$ .  
 b) Doble Conversión.  
 Filtro RF:  $f_{RF} = 10\text{MHz}$  y  $\Delta f_{RF} = 2\text{MHz}$ .  $f_{OL1} = 9\text{MHz}$ .  
 Filtro FI<sub>1</sub>:  $f_{FI1} = 1\text{MHz}$  y  $\Delta f_{RF} = 200\text{kHz}$ .  $f_{OL2} = 900\text{kHz}$ .  
 Filtro FI<sub>2</sub>:  $f_{FI2} = 100\text{kHz}$  y  $\Delta f_{RF} = 10\text{kHz}$ .  
 Para DBL-PS sólo sería necesario modificar el último filtro pasa-banda.

8. a)  $H_1: B_W = 2\text{kHz}$ .  $H_2: B_W = 20\text{kHz}$ .  
 b) Para  $H_1$ :

$$T_p(f) = \frac{\arctan\left(\frac{f-f_c}{f_1}\right) - \phi_c}{2\pi f} \quad T_g(f) = \frac{1}{2\pi} \frac{f_1}{(f-f_c)^2 + f_1^2}$$

Para  $H_2$ :

$$T_p(f) = \frac{2 \arctan\left(\frac{f-f_c}{f_1}\right) + \arctan\left(\frac{f-f_c}{f_2}\right) - \phi_c}{2\pi f} \quad T_g(f) = \frac{1}{\pi} \frac{f_1}{(f-f_c)^2 + f_1^2} + \frac{1}{2\pi} \frac{f_2}{(f-f_c)^2 + f_2^2}$$

- c)  $H_1: T_g(0) = 159\mu\text{s}$ .  $H_2: T_g(0) = 326\mu\text{s}$ .  
 Ancho de banda útil:  $B_W \approx 200\text{Hz}$  en ambos casos.