

Práctica 1

Modulaciones analógicas lineales

1. Objetivos

El objetivo de la práctica 1 es simular sistemas de comunicaciones basados en las modulaciones analógicas lineales: modulación en Doble Banda Lateral (DBL), modulación de amplitud (*Amplitude Modulation*, AM) y modulación en cuadratura (*Quadrature Modulation*, QM). Con ello, se pretende que el estudiante entienda el cometido de los bloques de un sistema de comunicaciones analógicas lineales y las características espectrales de las distintas modulaciones, además de que compruebe el efecto del ruido y el error de sincronismo en las prestaciones de los sistemas.

2. Modulación DBL

En este apartado se pretende simular un sistema de comunicaciones como el de la Figura 1, que está basado en la modulación DBL.

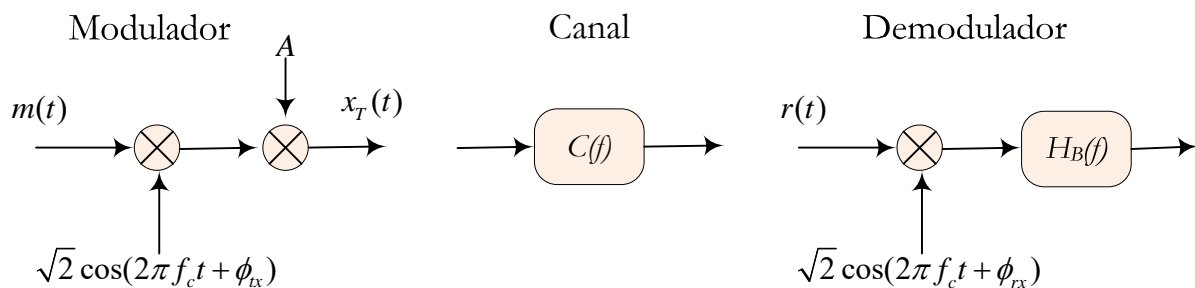


Figura 1: Esquema del sistema DBL simulado

Se partirá del programa sistDBL del Listado 1, escrito para la herramienta MATLAB. Como bien conoce, la herramienta MATLAB trabaja únicamente con señales en tiempo discreto. Esto obliga a muestrear las señales analógicas con las que realmente se desea trabajar, por lo que al principio del programa se define un parámetro denominado fs que representa una frecuencia de muestreo que carecería de sentido en un sistema real. Para simular la transmisión analógica de la señal, se le dará a fs un valor muy alto, muy por encima de la frecuencia de muestreo mínima que evita solapamientos. Además, y con el fin de permitir la representación de las señales empleadas, se define un vector t que contiene los instantes de tiempo a los que se han muestreado las señales.

Las principales características del resto del programa sistDBL son las siguientes:

- ✓ *Modulador.* Se asume que el ancho de banda de la señal de información es de 4 kHz. Se utiliza la rutina GenSignal para generar una señal dentro de esa banda: un tono de 1 kHz. Se utiliza una portadora de 20 kHz.
- ✓ *Canal.* Se incluye un canal que atenúa la señal 40 dB, pero que no introduce ruido.

Listado 1. sistDBL.m

```

% sistDBL.m
% Script que simula un sistema de comunicaciones utilizando modulación
% en doble banda lateral (DBL)

% ***** PARÁMETROS *****
% Parámetros generales
fs = 200E3; % Frecuencia de muestreo
t = 0:1/fs:0.8; % Eje de tiempos

% Parámetros del Modulador
W = 4E3; % Ancho de banda máximo de la moduladora
fm = 1E3; % Frecuencia de un tono dentro de la banda
f0 = 20E3; % Frecuencia de la portadora
A = 100; % Amplificación de la señal transmitida
faseTx = 0; % Desfase de la portadora usada en Transmisión
BT = _____; % Ancho de banda de la señal modulada en DBL
% Parámetros del Canal
a = 0.01; % Atenuación
N0_2 = 1e-8; % Densidad espectral de potencia del Ruido N0/2
% Parámetros del Demodulador
faseRx = 0; % Desfase de la portadora usada en Recepción
WPOS = _____; % Ancho de banda del filtro posdetector

% Parámetros de representación
t1 = 0.01; % Instante de tiempo inicial a representar
t2 = 0.02; % Instante de tiempo final a representar
% *****

% MODULADOR
m = GenSignal(t,'coseno',fm); % 1 tono dentro de la banda
% m = GenSignalSound(t,'chord',W); % Señal de audio
m = m / max(abs(m)); % m debe estar normalizada!
ptx = GenSignal(t,'coseno',f0,faseTx,A); % Tono utilizado para modular
xT = m * sqrt(2).*ptx; % Señal modulada en DBL

% CANAL (Sin Ruido)
r = a * xT;

% DEMODULADOR
prx = GenSignal(t,'coseno',f0,faseRx); % Tono utilizado para demodular
rL0 = r * sqrt(2).*prx;
rL = filtroPasoBajo(t,rL0,WPOS); % Señal demodulada

% REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS SEÑALES
close all;
% En el tiempo
figure(1); subplot(2,2,1); Osciloscopio(t,m,'Moduladora',t1,t2);
subplot(2,2,3); Osciloscopio(t,xT,'Señal modulada',t1,t2);
subplot(2,2,2); Osciloscopio(t,r,'Señal recibida',t1,t2);
subplot(2,2,4); Osciloscopio(t,rL,'Señal demodulada',t1,t2);

% En la frecuencia
figure(2); subplot(2,2,1); Espectro(t,m,'Espectro Moduladora',0,1.5*W);
subplot(2,2,3); Espectro(t,xT,'Espectro Modulada',f0-1.5*W,f0+1.5*W,f0-BT/2,f0+BT/2);
subplot(2,2,2); Espectro(t,r,'Espectro recibida',f0-1.5*W,f0+1.5*W);
subplot(2,2,4); Espectro(t,rL,'Espectro demodulada',0,1.5*W);
  
```

- ✓ *Demodulador.* No utiliza filtro predetector, pues es suficiente con el postdetector, que se implementa con la rutina FiltroPasoBajo. (Fíjese que esta rutina no puede implementar un filtro ideal. Si desea ver la respuesta en frecuencia del filtro implementado, quítele el símbolo de comentario a la línea 19.)
- ✓ *Representación de señales.* Las rutinas Osciloscopio y Espectro permiten representar las señales en el tiempo y en frecuencia. Al representar la señal modulada se pinta una línea en rojo que indica el ancho de banda de la señal BT.

Cuestión 2.1. Analice detenidamente el programa sistDBL para entender todo lo que hace. Complételo con el valor del ancho de banda de la señal modulada B_t en función de W . Diseñe el filtro receptor, esto es, asigne el valor apropiado a WPOS. A continuación, ejecútelo y explique la forma de las señales representadas en tiempo y en frecuencia.

Cuestión 2.2. Modifique el programa sistDBL para que utilice otro tipo de señales moduladoras: triangular, cuadrada, aleatoria. Consulte la ayuda de la función GenSignal para ello (help GenSignal). En el caso de las señales triangular y cuadrada, pruebe con los valores 1kHz, 500Hz y 100Hz del parámetro frecuencia de la función GenSignal. Compruebe para cada valor de frecuencia si la señal recibida es o no fiel a la señal transmitida. Explique el porqué y su relación con el valor de frecuencia. Cuando la señal moduladora elegida sea aleatoria, fije el parámetro frecuencia de la función GenSignal al valor W , máxima frecuencia de la señal.

Cuestión 2.3. Modifique el programa sistDBL para que utilice otros valores de frecuencia portadora (40kHz, 60kHz) y otros valores de amplificación de portadora (10, 1000). Explique las diferencias observadas en las figuras.

Cuestión 2.4. Fije de nuevo los parámetros anteriores a sus valores iniciales, es decir, $f_c = 20 \text{ KHz}$ y $A = 100$. Modifique el programa sistDBL con ayuda de la rutina GenSignalSound para que la señal de información sea la de un archivo de audio. Utilice archivos de audio como chord.wav o ding.wav. Con la rutina Reproducir escuche por unos auriculares la señal de información y la demodulada. Compruebe así que la señal transmitida se recibe correctamente.

Cuestión 2.5. Modifique el programa sistDBL para añadir al canal un ruido aditivo de densidad espectral de potencia $\frac{N_0}{2}$. Para ello, utilice la función Ruido. Ejecute el programa resultante para distintos valores de $\frac{N_0}{2}$ (10^{-6} , 10^{-8} , 10^{-10} , $10^{-12} \frac{W}{Hz}$) y para dos tipos de señales moduladoras: un tono y una señal de audio. Observe la figura de la señal demodulada y escúchela por unos auriculares. Haga una descripción cualitativa de cómo se oye.

2.1 Simulación de la relación señal a ruido recibida

Dado que DBL es una modulación lineal, se puede estimar la relación señal a ruido (*Signal to Noise Ratio*, SNR) a la salida del demodulador de la siguiente manera:

1. Simular el sistema cuando la señal recibida no se viera perturbada por ningún ruido. Medir la potencia de señal a la salida (sin ruido).
2. Simular el sistema cuando la señal recibida fuera sólo ruido. Estimar la potencia del ruido como la potencia de la señal a la salida¹.
3. Suponer que la señal recibida es la suma de las señales obtenidas en 1 y en 2. De esta forma, estimar la SNR como el cociente de las dos estimaciones de potencias previas.

¹ La señal de ruido se asume ergódica y tal que cualquier realización (suficientemente larga) es representativa de la señal. Por tanto, la potencia de una realización sirve para estimar su potencia.

Listado 2. snrDBL.m

```
% snrDBL.m
% Script que estima la SNR a la salida de un sistema DBL
% Asume que se ha llamado previamente a sistDBL y que las siguientes variables
% están definidas: A, a, W, xT, n, prx

% ***** CÁLCULO SNR SIMULADA *****
% DEMODULADOR cuando no hay ruido
rs = _____; % Señal recibida sin ruido
yss = rs*sqrt(2).*prx; % Señal multiplicada por el tono de Rx
ss = filtroPasoBajo(t,yss,WPOS); % Señal a la salida sin ruido
Ps_sim = _____; % Potencia de la señal

% DEMODULADOR cuando sólo hay ruido
rn = _____; % Señal recibida cuando sólo hay ruido
nn = rn*sqrt(2).*prx; % Ruido recibido multiplicado por el tono de Rx
ns = filtroPasoBajo(t,nn,WPOS); % Señal a la salida con sólo ruido
Pn_sim = _____; % Potencia del ruido

% SNR en decibelios
SNR_sim = _____;
disp(['SNRsimul = ' num2str(SNR_sim)]);

% ***** CÁLCULO SNR teórica *****

% Potencia de señal si la moduladora fuera un tono en función de A y a
Ps_teo = _____;

% Potencia del ruido en función N0_2 y WPOS
Pn_teo = _____;

% SNR en decibelios
SNR_teo = _____;
disp(['SNRteórica = ' num2str(SNR_teo)]);
```

Dese cuenta de que este procedimiento no se podría utilizar si el demodulador no fuera lineal.

Cuestión 2.6. Complete el Listado 2 del programa snrDBL para que estime la SNR a la salida del sistema DBL. Asuma que este programa se ejecuta a continuación del programa sistDBL y que, por tanto, todas las variables definidas en este último están disponibles. Para el cálculo de la potencia de una señal, puede emplear la función de MATLAB mean para realizar los promedios.

Cuestión 2.7. Complete el Listado 2 para que también realice el cálculo teórico de la SNR a la salida del receptor en el caso de que la moduladora sea un tono. Exprésela en función de los parámetros A , a , $\frac{N_0}{2}$ y W . Justifique adecuadamente las expresiones empleadas. Configure el programa sistDBL para que la señal moduladora sea un tono de amplitud tal que la potencia transmitida sea 5 dBw, la atenuación del canal sean 20 dB y la densidad espectral de potencia $\frac{N_0}{2} = 10^{-10} \frac{W}{Hz}$. Anote los valores de SNR simulados. ¿Hasta qué punto son similares a los teóricos?

Cuestión 2.8. Modifique el ancho de banda del filtro postdetector de manera que sea 4 veces mayor que el ancho de banda de la señal de información. Vuelva a estimar la SNR y

compruebe en qué medida disminuye. Explique por qué, calcule teóricamente cuánto y compruebe si dicho valor teórico encaja con el valor estimado de SNR.

Cuestión 2.9. Con idea de saber, de manera subjetiva, qué valores de SNR son adecuados para una señal de audio, realice el siguiente experimento. Utilice alguna de las señales de audio (chord.wav o ding.wav) como señal moduladora y, modificando el valor de $\frac{N_0}{2}$ o de A del programa sistDBL, estime valores de SNR para los que considere que la señal se oye perfectamente, con ruido moderado y con ruido muy molesto.

3. Modulación AM

3.1 Demodulación coherente

Cuestión 3.1. A partir del programa sistDBL, cree el programa sistAM para que simule el sistema de la Figura 2 basado en la modulación AM con demodulación coherente. Para ello, puede utilizar la rutina SupContinua que suprime la componente de continua de una señal. Dé valor al índice de modulación $\mu = 0.8$. Repita las cuestiones 2.1, 2.2 (sólo para la señal triangular), 2.4 y 2.5 aplicadas a esta modulación.

Cuestión 3.2. Modifique el programa sistAM variando el índice de modulación μ a los siguientes valores: 0.5, 1 y 2. Explique las diferencias que observe en las señales implicadas. ¿Tiene algún efecto el que haya sobremodulación, $\mu > 1$?

Cuestión 3.3. Repita los apartados 2.6 y 2.7 para la modulación AM. Para ello, cree el programa correspondiente, snrAM. Obtenga la SNR para los siguientes valores de μ : 0.25, 0.5, 0.8 y 1. Compare los resultados con los que obtuvo para la DBL.

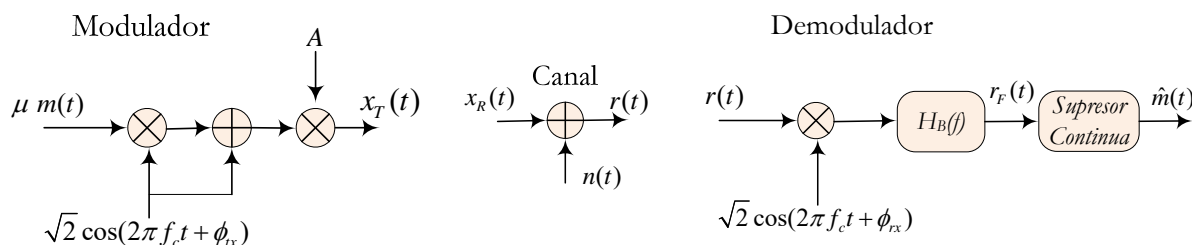


Figura 2: Esquema del sistema AM con demodulador coherente simulado

3.2 Demodulación incoherente

Cuestión 3.4. A partir del programa sistAM, cree uno nuevo llamado sistAMInco en el que ahora el demodulador sea incoherente y utilice un detector de envolvente. Para ello, modifique la parte que tiene que ver con el demodulador para que sea acorde con el esquema de la Figura 3. Puede utilizar la rutina Rectificador que rectifica la señal que se le pasa como entrada. Utilice el comando subplot y la rutina Osciloscopio para crear una figura en la que se pinte la señal recibida, la señal tras el rectificador, tras el filtro paso bajo y tras el supresor de continua. Ejecute el programa así creado, analice las señales generadas y explique el funcionamiento del demodulador.

Cuestión 3.5. Repita la cuestión 3.2 aplicada a este nuevo sistema con demodulación incoherente. Analice las señales en las diferentes etapas del demodulador para los distintos

valores de μ y compare los resultados obtenidos con los del demodulador coherente. ¿Aprecia alguna diferencia? ¿A qué se debe?



Figura 3: Esquema del detector de envolvente de AM

4. Modulación QM

Cuestión 4.1. Complete el programa sistQM del Listado 3 para que simule el sistema de la Figura 4, basado en la modulación QM. Compruebe que se reciben correctamente las dos señales transmitidas y repita las cuestiones 2.1, 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7 aplicadas a esta modulación.

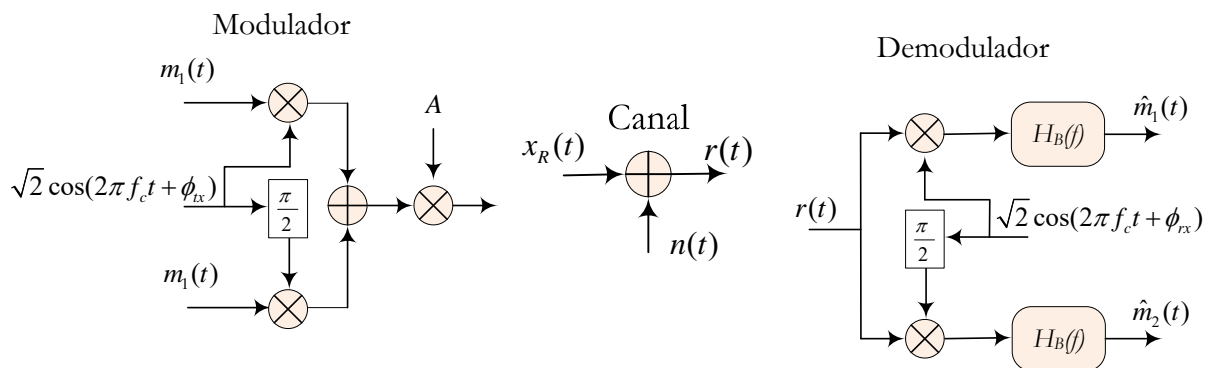


Figura 4: Esquema del sistema QM simulado

Listado 3. sistQM.m

```
% sistQM.m
% Script que simula un sistema de comunicaciones utilizando modulación MQ

% ***** PARÁMETROS *****
% Parámetros generales
fs = 200E3; % Frecuencia de muestreo
t = 0:1/fs:0.8; % Eje de tiempos

% Parámetros del Modulador
W = 4E3; % Ancho de banda máximo de las moduladoras
fm1 = 1E3; % Frecuencia de un tono dentro de la banda
fm2 = 0.2E3; % Frecuencia de otro señal dentro de la banda
f0 = 20E3; % Frecuencia de la portadora
A = 100; % Amplificación de la señal transmitida
faseTx = 0; % Desfase de la portadora usada en Transmisión
Bt = _____; % Ancho de banda de la señal modulada MQ

% Parámetros del Canal
a = 0.01; % Atenuación
N0_2 = 0;%1e-10; % Densidad espectral de potencia del Ruido

% Parámetros del Demodulador
faseRx = 0; % Desfase de la portadora usada en Recepción
WPOS = _____; %Ancho de banda del filtro posdetector
```

```
% Parámetros de representación
t1 = 0.01; % Instante de tiempo inicial a representar
t2 = 0.02; % Instante de tiempo final a representar
% *****

% MODULADOR
% Señal en fase
m1 = GenSignal(t,'coseno',fm1); % Señal en fase
% m1 = GenSignalSound(t,'chord',W); % Señal de audio
m2 = GenSignal(t,'triangular',fm2,0); % Señal en cuadratura
% m2 = GenSignalSound(t,'ding',W);

ptx1 = GenSignal(t,'coseno',f0,faseTx,A); % Portadora en fase
ptx2 = GenSignal(t,'coseno',f0,faseTx+_____,A); % Portadora en cuadratura

xT = _____; % Señal modulada

% CANAL (SIN RUIDO)
r = _____; % Señal recibida

% DEMODULACIÓN DE LA COMPONENTE EN FASE
prx1 = GenSignal(t,'coseno',f0,faseRx); % Tono utilizado para demodular en fase
ys = r*sqrt(2)*prx1;
s1 = filtroPasoBajo(t,ys,WPOS); % Señal demodulada en fase

% DEMODULACIÓN DE LA COMPONENTE EN CUADRATURA
prx2 = GenSignal(t,'coseno',f0,faseRx+_____,A); % Tono utilizado para demodular en fase
ys = _____;
s2 = _____; % Señal demodulada en cuadratura

% REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS SEÑALES
close all;
% En el tiempo
figure(1); subplot(2,2,1); Osciloscopio(t,m1,'Moduladora1',t1,t2);
subplot(2,2,2); Osciloscopio(t,m2,'Moduladora2',t1,t2);
subplot(2,2,3); Osciloscopio(t,s1,'Señal demodulada1',t1,t2);
subplot(2,2,4); Osciloscopio(t,s2,'Señal demodulada2',t1,t2);

figure(2); subplot(2,1,1); Osciloscopio(t,xT,'Señal modulada',t1,t2);
subplot(2,1,2); Osciloscopio(t,r,'Señal recibida',t1,t2);

% En la frecuencia
figure(3); subplot(2,2,1); Espectro(t,m1,'Espectro Moduladora1',0,1.5*W);
subplot(2,2,2); Espectro(t,m2,'Espectro Moduladora2',0,1.5*W);
subplot(2,2,3); Espectro(t,s1,'Espectro demodulada1',0,1.5*W);
subplot(2,2,4); Espectro(t,s2,'Espectro demodulada2',0,1.5*W);

figure(4); subplot(2,1,1); Espectro(t,xT,'Espectro Modulada',f0-1.5*W,f0+1.5*W,f0-Bt/2,f0+Bt/2);
subplot(2,1,2); Espectro(t,r,'Espectro recibida',f0-1.5*W,f0+1.5*W);
```

5. Análisis del error de sincronismo

Se va a proceder a estudiar el efecto de los errores de fase y frecuencia, es decir, las consecuencias de que la fase o la frecuencia de la portadora utilizada en recepción no coincidan con las utilizadas en transmisión.

Cuestión 5.1. Modifique el parámetro faseTx en los programas sistAM y sistMQ con los valores $\frac{\pi}{4}$, $\frac{\pi}{2}$ y π . Para cada valor de faseTx explique lo que ocurre en la señal o señales recibidas para las dos modulaciones AM y QM. Para ello, por un lado, analice las gráficas de las señales recibidas en comparación con las de las transmitidas. Por otro, escuche por unos auriculares tanto unas como otras. En el caso AM emplee una senoide como señal moduladora. En el caso de la QM utilice una señal de audio diferente para cada moduladora.

Cuestión 5.2. Introduzca un nuevo parámetro, Deltaf, en los programas sistAM que simule el error en la frecuencia de la portadora usada en transmisión. Modifique las líneas necesarias de los programas. Emplee una senoide como señal moduladora. Utilice los valores 100Hz y 500Hz del parámetro Deltaf y explique lo que ocurre con la señal o señales recibidas. Para ello, analice las gráficas y escuche por los auriculares las señales transmitidas y recibidas. En particular, describa el espectro de la señal demodulada.

Cuestión 5.3. Repita las cuestiones 5.1 y 5.2 para la modulación AM con detección incoherente. Justifique las ventajas e inconvenientes del demodulador incoherente frente al coherente.