

COMUNICACIONES - AÑO 2015

Práctica 4: Sistemas de Modulación Exponencial.

1. Desviaciones varias

- a) Un transmisor de FM tiene salida $x(t) = A \cos \left(2\pi f_p t + 2\pi f_d \int_{-\infty}^t m(\alpha) d\alpha \right)$, con $f_d = 30\text{Hz/V}$. Para cada uno de los siguientes casos encuentre la desviación de fase (en radianes) y la desviación de frecuencia (en Hz). Grafique.
- $m(t) = 2 \square(t - 0,5)$
 - $m(t) = 3 \wedge(t - 1)$
 - $m(t) = \text{sen}(2\pi t)u(t)$
 - $m(t) = e^{-t}u(t)$
- b) La portadora usada por un transmisor es $f_p = 1\text{kHz}$. Encuentre la desviación de fase y de frecuencia para las siguientes salidas del transmisor
- $x(t) = \cos(2\pi 1100t)$
 - $x(t) = \cos(2\pi 1000t + 10t^2)$
 - $x(t) = \cos(2\pi 1000t^2)$
 - $x(t) = \cos(2\pi 1100t + \text{sen}(2\pi t))$
- c) Una señal de audio $m(t)$ tiene ancho de banda $W = 15\text{kHz}$ y el valor pico de $|m(t)|$ es 5V. Esta señal modula en FM a una portadora. Calcule la relación de desviación de frecuencia (D) y el ancho de banda aproximado de la señal generada si la constante de desviación del modulador es:
- $f_d = 30\text{Hz/V}$
 - $f_d = 300\text{Hz/V}$
 - $f_d = 3\text{kHz/V}$
 - $f_d = 30\text{kHz/V}$

2. Banda ancha vs. banda angosta

- a) Dado un mensaje aleatorio $M(t)$ ESA, con media nula y ancho de banda W se genera la señal $X(t) = A \cos(2\pi f_p t + k_p M(t))$, con $f_p \gg W$ y $k_p \ll 1$.
- ¿Qué tipo de modulación posee la señal? Encuentre la desviación de fase y de frecuencia.
 - Encuentre una expresión aproximada para $X(t)$. Dibuje un circuito que permita generar $x(t)$ usando esta aproximación.
 - Haga un esquema del espectro de $X(t)$ y calcule su potencia si P_M es la potencia de $M(t)$.
 - Verifique que, mientras sea válida la aproximación de banda angosta, esta modulación se comporta incrementalmente lineal (puede ver qué se obtiene al modular con $aM_1(t) + bM_2(t)$).
 - Eleve $X(t)$ al cuadrado y filtre la componente de continua ¿Cuál es la nueva frecuencia de portadora? ¿Cuál es la nueva desviación de fase?
- b) Una señal con valor pico 1V y ancho de banda 10kHz se debe modular en FM con $f_p = 100\text{MHz}$.
- Alguien asegura que si se utiliza $f_d = 1\text{kHz/V}$ el ancho de banda ocupado será 2kHz y que así se puede ahorrar ancho de banda respecto a los sistemas de modulación lineal. ¿Está en lo cierto?
 - Si se utilizara $f_d = 1\text{MHz/V}$ ¿Será el ancho de banda 2MHz? Explique las diferencias con I.
- c) Se tiene una señal $x(t) = A \cos(2\pi f_p t + k_p m(t))$ con $f_p = 1\text{MHz}$ y $k_p = 0,1$. Proponga un circuito que permita cambiar los parámetros de $x(t)$ a $f_p = 90\text{MHz}$ y $k_p = 5$. Considere que $m(t)$ posee valor absoluto máximo uno y que su ancho de banda es 10kHz.
- d) Se desea construir un transmisor de FM con portadora $f_p = 180\text{MHz}$ y desviación máxima de frecuencia 25kHz, para mensajes con ancho de banda de 16kHz. Para ello se cuenta con:
- Un VCO con $f_0 = 2\text{MHz}$, constante 400Hz/V y rango de tensiones de entrada $\pm 0,5\text{V}$.
 - Multiplicadores de frecuencia $\times 2$, $\times 3$ y $\times 5$.
 - Mezcladores, derivadores, integradores y amplificadores.
 - Osciladores fijos entre 1 y 300MHz.
 - Filtros pasabajos y pasabanda.
- Haga un diagrama en bloques del transmisor ¿En qué puntos la señal es FM de banda ancha?
 - Se aplica al transmisor una señal sinusoidal de 0.1V y frecuencia 1kHz. Dibuje aproximadamente el espectro de la señal en cada punto del diagrama.
 - Modifique el transmisor para que module en PM.

3. Espectro de FM en Matlab

Se propone analizar el comportamiento del espectro de las señales de FM mediante simulación. En primer lugar usaremos un mensaje sinusoidal para poder comparar con los resultados teóricos conocidos, luego pasaremos a usar un mensaje aleatorio y por último usaremos muestras la señal de FM comercial local.

- a) Genere un mensaje sinusoidal de frecuencia 25 kHz y largo $N = 1e6$. Para que se puedan apreciar los detalles en el espectro conviene utilizar una frecuencia de muestreo de 1MHz. Estime su DEP promediando FFT's de largo 1000, usando la función `pwelch` como en ejercicios anteriores. Para ello puede guiarse por las siguientes sentencias:

```
fm=1000000; N=1000000; t=0:1/fm:(N-1)/fm; m=cos(2*pi*25000*t);
```

- b) Calcule la señal modulada en FM usando una portadora en $f_c = 250$ kHz y $\beta = 0,1$, $\beta = 1$ y $\beta = 10$. Obtenga su DEP estimada en escala lineal y logarítmica. Para ello puede guiarse por las siguientes sentencias:

```
fc= 250000; Ac= 10; tita=2*pi*rand; %Datos de la portadora
mn=m/max(m); phi=cumsum(mn)*1/fm; fd=1000; %Mensaje y modulación
xc=Ac.*cos(2*pi*fc.*t.'+2*pi*2.5*fd*phi.'+tita);
figure(1); plot(t,xc); title('Señal modulada en FM')
figure(2); [Sxx,f]=pwelch(xc,ones(1,100000),0,[],fm,'twosided');
plot(f,Sxx); title('Densidad Espectral de Potencia Estimada')
figure(3); pwelch(xc,ones(1,10000),0,[],fm,'twosided');
```

Compare los resultados obtenidos analizando si la señal es de banda angosta, o ancha, y calculando los valores de las funciones de Bessel correspondientes.

- c) Genere un mensaje aleatorio con media nula, distribución gaussiana y ancho de banda 25 kHz. Para ello puede guiarse por las siguientes sentencias:

```
m=randn(size(t)); [B,A]=butter(14,.05); m=filter(B,A,m);
m=filter([1 -1]*fm,1,m); % Aprox. un derivador (aumenta las altas frecuencias).
m=m-mean(m);
```

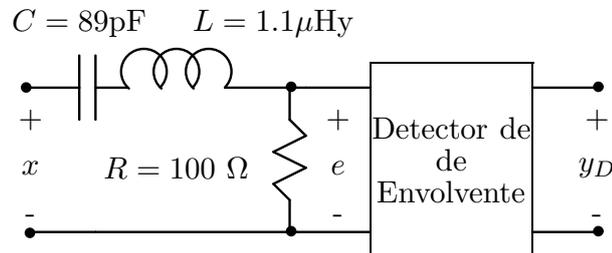
Obtenga su DEP estimada en escala lineal y logarítmica, promediando FFT's de largo 1000.

- d) Calcule la señal modulada en FM usando una portadora en $f_c = 250$ kHz y $D = 0,1$, $D = 1$ y $D = 10$. Obtenga su DEP estimada en escala lineal y logarítmica. En el caso banda angosta, ¿reconoce que la forma de su espectro proviene del espectro original del mensaje? Para apreciarlo mejor puede descontar la portadora antes de calcular la DEP. En el caso banda ancha ¿puede apreciar que el espectro empirza a tener más la forma de la distribución de amplitudes del mensaje?
- e) Del sitio web de la materia descargue el archivo `signal_modFM.zip` que contiene muestras de la señal de dos estaciones de radio FM comercial local muestreada a $f_s = 1,024$ MHz. Descomprímalo y cárguelo en Matlab. Obtenga su DEP estimada promediando como en los incisos anteriores. ¿Puede distinguir las dos estaciones? ¿Cuánto es aproximadamente su ancho de banda? Compare con el ancho de banda de Carson obtenido para una desviación máxima de 75kHz y un ancho de banda del mensaje de 15kHz. Si se anima, intente demodular los mensajes ;)

4. Modulando y demodulando FM con resonancias.

- a) Suponga que una señal de FM se genera directamente variando la frecuencia de un oscilador LC. El valor de inductancia es L mientras que la capacidad varía con la señal moduladora de acuerdo a $C = C_0 + km(t)$. Calcule la frecuencia de resonancia del oscilador. Estime en qué rango de amplitudes la frecuencia generada varía en forma lineal con $m(t)$ (en el desarrollo en serie de Taylor considere que el término cuadrático sea 10 veces menor al lineal).

- b) Considere el siguiente esquema de un discriminador de FM. La impedancia de entrada del detector de envolvente puede considerarse infinita. Calcule y grafique el módulo de la transferencia $E(f)/X(f)$. A partir de este dibujo determine para qué portadora es adecuado y obtenga la constante del discriminador K_D . Estime en forma aproximada la máxima desviación de frecuencia permitida a la señal de entrada (considere un error del 1%).



- c) Ajuste los valores de R , L y C en el circuito anterior para diseñar un discriminador para señales con portadora en 100MHz y desviación de frecuencia máxima 20MHz.

5. El ABC del PLL.

- a) Considere un PLL de primer orden con detector sinusoidal y filtro de lazo $F(s) = 1$. El VCO posee frecuencia de oscilación libre f_0 y ganancia K_0 .
- I. Obtenga la ganancia del detector de fase K_d . Haga un esquema del modelo lineal del PLL.
 - II. Obtenga la transferencia de lazo cerrado del PLL. Usando el teorema del valor final muestre que si la frecuencia de entrada es f_0 entonces se logra el enganche de fase, pero si la frecuencia de entrada es distinta se logra enganche de frecuencia, pero con error de fase.
 - III. Grafique la característica no lineal del detector. Teniendo en cuenta los resultados de II. halle los valores de frecuencia de entrada que el PLL puede seguir (rango de enganche del lazo).
 - IV. Muestre que el ancho de banda equivalente de ruido del PLL es $B_N = K_0 K_d / 4$.
- b) Se reemplaza el filtro de lazo en el PLL por $F(s) = k_P + k_I/s$, con $k_I > K_0 K_d k_p^2 / 4$.
- I. ¿Cuál es el orden del PLL? ¿Y el Tipo? Haga un esquema del modelo lineal del nuevo PLL.
 - II. Obtenga la transferencia de lazo cerrado del PLL. Usando el teorema del valor final muestre que incluso cuando la frecuencia de entrada es distinta a f_0 se logra el enganche de fase. ¿Cuál es el rango de enganche teórico del PLL? ¿Qué cuestión práctica limitará el rango en un PLL real?
 - III. Halle el error de estado estacionario (de fase) cuando la frecuencia de entrada está variando uniformemente, con velocidad $df/dt = \dot{f}$. Teniendo en cuenta la característica no lineal del detector halle el rango de valores de cambio de frecuencia de entrada que el PLL puede seguir.
 - IV. Muestre que el ancho de banda equivalente de ruido del PLL es $B_N = \omega_n (\xi + 1/(4\xi)) / 2$, con $\omega_n^2 = K_0 K_d k_I$ y $\xi^2 = K_0 K_d k_p^2 / (4k_I)$. Halle el valor de ξ que logra el menor ancho de banda de ruido, para un ω_n dado.
- c) ¿Cuántos puntos de equilibrio tiene este PLL? ¿Y el modelo lineal? Relacione esta característica no lineal con la periodicidad de la fase. ¿Qué son los saltos de ciclo?

6. Transmisor de FM con PLL.

Se desea construir un PLL para utilizarlo como sintetizador de frecuencia en un transmisor de FM de radiodifusión. La portadora debe tener valores entre 87.5MHz y 108MHz con saltos de 500kHz. Para ello se cuenta con:

- Un VCO con rango de frecuencias de 80MHz a 120MHz y rango de tensiones de entrada 0 a 5V.
- Un oscilador de referencia a cristal de 100kHz.
- Divisores de frecuencia fijos que operan hasta 200MHz.
- Divisores programables que operan hasta 25MHz.
- Un detector de fase de compuerta X-OR con niveles 0 a 5V.
- Un filtro activo.

- a) Dibuje un diagrama en bloques del sintetizador y los valores requeridos para los divisores.
- b) Indique como puede modificarse el esquema anterior para utilizarlo como modulador directo de FM para una señal en banda base $m(t)$, con ancho de banda de 100Hz a 15kHz. Considere que la desviación máxima de frecuencia es de 75kHz.
- c) Calcule qué índice de desviación posee la señal de salida, y la señal que ingresa al detector de fase. Indique cuál de estas señales puede considerarse una señal de FM de banda angosta. ¿Qué ancho de banda deberá tener la transferencia de lazo cerrado para que la estabilidad de la portadora no sea afectada por la modulación?
- d) ¿Por qué es necesario que el filtro empleado en el PLL sea activo? Considerando el ancho de banda indicado en c) ¿qué problema puede tener este esquema al realizar un cambio en la frecuencia de portadora?

7. Teléfono inalámbrico.

Se desea construir un receptor para un teléfono inalámbrico que opere en cualquiera de los 10 canales posibles, ubicados en la banda de 46.5MHz a 47MHz. La señal de voz, con espectro limitado a 5KHz, modula a la portadora en FM con una desviación máxima de frecuencia de ± 15 kHz. Se deben utilizar filtros fijos con $Q < 50$, osciladores fijos y/o 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 la frecuencia del oscilador, y en lo posible es conveniente utilizar valores normalizados (455kHz; 1,75MHz; 10,7MHz; 38,9MHz; 70MHz).

- a) Calcule el ancho de banda de la señal.
- b) Realice un esquema del receptor. Especifique los anchos de banda de los filtros y las frecuencias de los osciladores, teniendo en cuenta el rechazo de las frec. imágenes.
- c) ¿Qué ventaja práctica hay en la demodulación por usar FM y no DBL o BLU? Proponga un esquema para la demodulación del mensaje.

Algunos resultados

1. b) I. $\Delta\theta = 2\pi 100t$ rad, $\Delta f = 100$ Hz.
 II. $\Delta\theta = 10t^2$ rad, $\Delta f = 10t/\pi$ Hz.
 III. $\Delta\theta = 2\pi 1000(t^2 - t)$ rad, $\Delta f = 1000(2t - 1)$ Hz.
 IV. $\Delta\theta = 2\pi 100t + \sin(2\pi t)$ rad, $\Delta f = 100 + \cos(2\pi t)$ Hz.
- c) I. $D = 0,01$, $B_c = 30,3$ kHz.
 II. $D = 0,1$, $B_c = 33$ kHz.
 III. $D = 1$, $B_c = 60$ kHz.
 IV. $D = 10$, $B_c = 330$ kHz.
2. a) I. $\Delta\theta = k_p M(t)$ rad, $\Delta f = \frac{k_p}{2\pi} \frac{dM(t)}{dt}$ Hz.
 II. $X(t) \simeq A \cos(2\pi f_p t) - A k_p M(t) \sin(2\pi f_p t)$.
 III. $P_X = \frac{A^2}{2} + \frac{A^2 k_p^2}{2} P_M$.
 v. Portadora en $2f_p$, $\Delta\theta = 2k_p M(t)$.
4. a) $|m(t)| \leq \frac{2C_0}{15k}$
5. a) II. $\frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{K_d K_0}{s + K_d K_0}$ III. $|\Delta\omega| < K_d K_0$
 b) II. $\frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{K_d K_0 k_{PS} + K_d K_0 k_I}{s^2 + K_d K_0 k_{PS} + K_d K_0 k_I}$.
 El rango de enganche teórico es infinito. En la práctica está limitado por el VCO.
 III. $\theta_e(t) \xrightarrow[t \rightarrow \infty]{} \frac{\dot{f}}{2\pi K_d K_0 k_I}$; $|\Delta\dot{\omega}| < K_d K_0 k_I$