

## ***Laboratorio***

### ***Esquemas de modulación digital***

#### **Transmisión digital pasa-banda**

En la modulación digital pasa-banda básicamente se tienen tres tipos: *modulación por desplazamiento de amplitud* (ASK – *amplitude-shift keying*), *modulación por desplazamiento de fase* (PSK - *phase-shift keying*) y *modulación por desplazamiento de frecuencia* (FSK – *frequency-shift keying*).

ASK es un esquema de modulación digital que transporta datos cambiando (modulando) la amplitud de una señal de referencia (onda portadora), mientras que en PSK los datos se transmiten modulando la fase de la onda portadora, y en FSK la información digital se transmite por medio de cambios de frecuencia discretos de la portadora. En cada caso, los otros dos parámetros de la portadora (amplitud, fase o frecuencia) que no se modulan se mantienen constantes.

En este laboratorio, el objetivo es comprender las características de los esquemas de modulación digital más comunes (ASK, PSK, FSK, QAM) y sus formas de demodulación coherente y no-coherente.

#### **Modulación de Amplitud (ASK)**

Las formas de onda de las señales PAM digitales banda base son

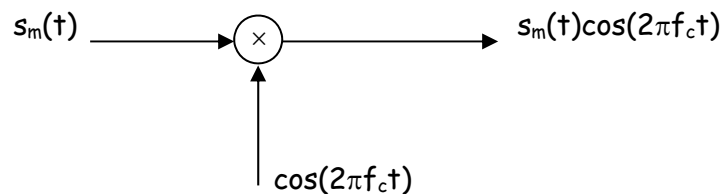
$$s_m(t) = A_m g_T(t)$$

donde  $A_m$  es la amplitud de la  $m$ -ésima forma de onda y  $g_T(t)$  es un pulso cuya forma está determinada por las características espectrales de la señal transmitida. Se asume que el espectro de la señal banda base está contenido en la banda de frecuencia  $|f| \leq W$ , donde  $W$  es el ancho de banda de  $|G_T(f)|^2$ . Recuerde que la amplitud de la señal toma valores discretos

$$A_m = (2m - 1 - M)d, \quad m = 1, 2, \dots, M$$

donde  $2d$  es la distancia Euclidiana entre dos puntos de señales adyacentes.

Para la transmisión de esta señal banda-base, la misma se multiplica por una portadora sinusoidal como se muestra a continuación.



Modulación de Amplitud.

Así, la señal de salida  $x_m(t)$  es  $A_m g_T(t) \cos 2\pi f_c t$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$ .

Si la secuencia de pulsos transmitido es unipolar, representando una secuencia de datos binarios, la modulación de amplitud de portadora se denomina BASK.

Si se tiene una secuencia de datos no-binarios, símbolos, y los mismos se representan por pulsos de M-amplitudes distintas, la señal resultante es una onda modulada M-ASK,

$$u_m(t) = s_m \psi(t)$$

donde  $x(t) = g_T(t) \cos 2\pi f_c t$  y  $s_m = A_m$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$

La forma de onda  $x(t)$  se normaliza de forma que su energía es uno.

### Modulación de Fase (PSK)

En la modulación de fase, la información que se transmite sobre el canal de comunicación se imprime en la fase de la portadora. Las fases utilizadas para la transmisión de información digital en un sistema M-PSK son

$$\theta_m = \frac{2\pi m}{M}, \quad \text{para } m = 0, 1, \dots, M-1$$

con  $M = 2^k$ , donde  $k$  es el número de bits de información por símbolo transmitido.

La representación general de un conjunto de M formas de onda moduladas en fase es

$$u_m(t) = A g_T(t) \cos \left( 2\pi f_c t + \frac{2\pi m}{M} \right), \quad m = 0, 1, \dots, M-1$$

donde  $g_T(t)$  es la forma del filtro para el pulso transmitido, el cual determina las características espectrales de la señal transmitida y  $A$  es la amplitud de la señal. Todas las señales PSK tiene igual energía, i.e.,

$$E_m = \int_{-\infty}^{\infty} u_m^2(t) dt = \frac{A^2}{2} \int_{-\infty}^{\infty} g_T^2(t) dt \equiv E_s \quad \forall m.$$

donde  $E_s$  denota la energía transmitida por símbolo.

Cuando  $g_T(t)$  es un pulso rectangular, las formas de onda de las señales transmitidas en el intervalo de símbolo  $0 \leq t \leq T$  puede expresarse como

$$u_m(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T}} \cos \left( 2\pi f_c t + \frac{2\pi m}{M} \right), \quad m = 0, 1, \dots, M-1.$$

Observe que las señales tienen una envolvente constante y la portadora cambia de fase abruptamente al inicio de cada intervalo.

La señal  $u_m(t)$  también puede expresarse como la suma de dos señales ortogonales o dos componentes en cuadratura (como vector),

$$u_m(t) = \sqrt{E_s} g_T(t) \cos\left(\frac{2\pi m}{M}\right) \cos(2\pi f_c t) - \sqrt{E_s} g_T(t) \sin\left(\frac{2\pi m}{M}\right) \sin(2\pi f_c t).$$

Normalizando apropiadamente la forma del pulso  $g_T(t)$  se puede normalizar la energía de las dos funciones base  $\psi_1(t)$  y  $\psi_2(t)$  a la unidad,

$$\psi_1(t) = g_T(t) \cos(2\pi f_c t), \quad \psi_2(t) = -g_T(t) \sin(2\pi f_c t)$$

### Modulación de Frecuencia (FSK)

La modulación digital de frecuencia es un método adecuado para canales que no tienen la estabilidad de fase necesaria para realizar una estimación de la fase de la portadora.

La modulación multinivel de frecuencia requiere de  $M$  frecuencias diferentes, permitiendo la transmisión de bloques de  $k = \log_2 M$  bits por forma de onda de la señal transmitida. En general la señal transmitida se puede expresar como

$$u_m(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T}} \cos(2\pi f_c t + 2\pi m \Delta f t), \quad m = 0, \dots, M-1,$$

donde  $E_s = kE_b$  es la energía por símbolo,  $T = kT_b$  es el intervalo de símbolo y  $\Delta f$  es la separación de frecuencia entre las frecuencias sucesivas, i.e.,  $\Delta f = f_m - f_{m-1}$  para toda  $m = 1, 2, \dots, M-1$ , donde  $f_m = f_c + m\Delta f$ .

Note que todas las formas de onda M-FSK tienen igual energía,  $E_s$ . La separación de frecuencia  $\Delta f$  determina el grado de discriminación entre las  $M$  posibles señales transmitidas en el receptor. Como medida de similitud (o diferencia) entre un par de formas de onda de señal se utiliza el coeficiente de correlación  $\gamma_{mn}$ ,

$$\gamma_{mn} = \frac{1}{E_s} \int_0^T u_m(t) u_n(t) dt$$

$$\gamma_{mn} = \frac{\sin 2\pi(m-n)\Delta f T}{2\pi(m-n)\Delta f T}$$

Si se grafica  $\gamma_{mn}$  en función de  $\Delta f$  se observa que las formas de onda  $m$  y  $n$  son ortogonales cuando  $\Delta f$  es un múltiplo de  $1/2T$ . Así, la mínima separación de frecuencia entre dos frecuencias sucesivas para lograr ortogonalidad es  $1/2T$ . El coeficiente de correlación mínimo es  $\gamma_{mn} = -0.217$  y ocurre cuando  $\Delta f = 0.715/T$ .

## Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM)

La modulación de amplitud en cuadratura QAM utiliza dos portadoras en cuadratura  $\cos(2\pi f_c t)$  y  $\sin(2\pi f_c t)$ , cada una de las cuales es modulada por una secuencia independiente de bits de información. Las formas de onda de la señal transmitida tienen la forma

$$u_m(t) = A_{mc} g_T(t) \cos(2\pi f_c t) + A_{ms} g_T(t) \sin(2\pi f_c t), \quad m = 1, \dots, M.$$

donde  $\{A_{mc}\}$  y  $\{A_{ms}\}$  son los conjuntos de amplitudes que se obtienen de mapear secuencias de  $k$ -bits en amplitudes de señales. Se obtienen constelaciones rectangulares cuando dos portadoras en cuadratura se modulan cada una por PAM.

En general, QAM se puede ver como una forma de combinar modulaciones digitales de amplitud y fase. Así, la señal QAM transmitida se puede expresar como

$$u_{mn}(t) = A_m g_T(t) \cos(2\pi f_c t + \theta_n), \quad m = 1, \dots, M_1; \quad n = 1, \dots, M_2$$

Si  $M_1 = 2^{k_1}$  y  $M_2 = 2^{k_2}$ , la combinación de modulación de amplitud y fase resulta en la transmisión simultánea de  $k_1 + k_2 = \log_2 M_1 M_2$  dígitos binarios a una razón  $R_b/(k_1 + k_2)$ .

La demodulación de señales QAM en canales AWGN se realiza correlacionando la señal recibida con las dos funciones base en cuadratura

$$\psi_1(t) = g_T(t) \cos(2\pi f_c t + \phi),$$

$$\psi_2(t) = g_T(t) \sin(2\pi f_c t + \phi).$$

### 1. Esquemas básicos binarios

En esta sección se modelan y simulan los esquemas de modulación binarios básicos. Los aspectos considerados son: moduladores, formas de onda, demoduladores, espectros y los diagramas de constelación.

El código Lab7\_1.m para simulación y análisis en Octave tiene los siguientes elementos:

- a. Definición de parámetros básicos para la simulación.
- b. Menú de selección.
- c. Secuencia de datos
- d. Secuencia de símbolos y soporte
- e. Modulación – onda transmitida
- f. Demodulación – símbolos detectados
- g. Gráficas

1. Analice el código y describa la funcionalidad de cada sección.
2. Modifique el código e incluya una sección para calcular el espectro de magnitud de los símbolos (señal banda-base).
3. Modifique el código e incluya una sección para calcular el espectro de magnitud de las señales transmitidas moduladas (señal pasa-banda).
4. Modifique el código para graficar los espectros de (2) y (3) en una misma gráfica, y ubíquela en la posición (2) de la ventana de figuras.
5. Modifique el código para graficar la constelación del esquema de modulación dado a partir de las señales transmitidas, y ubique la gráfica en la posición (6) de la ventana de figuras.

### Esquemas multinivel

Desarrolle un código que modele y simule la transmisión y recuperación de datos y permita visualizar las *características* indicadas para los siguientes esquemas de modulación digital:

- M-ASK
- M-PSK
- M-FSK
- M-QAM
- DPSK

#### *Características:*

- datos transmitidos y su espectro de amplitud,
- la señal modulada y su espectro de amplitud,
- la demodulación y visualización de los símbolos recuperados,
- la envolvente de la señal modulada,
- la constelación de la señal modulada (excepto para M-FSK).

```

Lab7_1
% Conceptos básicos de modulación pasa-banda
% BASK - BPSK - M-ASK - BFSK
% Se requieren los pkg signal, communications, control
% Carlos A. Medina C. 2021

clc; clear;
up = 100;    % factor de sobremuestreo
N = 15;      % longitud de los datos
dt= 1/up;    % intervalo de muestras
T = 1;       % duración de símbolo
fc = 2;      % frecuencia de la portadora

fprintf('Esquemas básicos de modulación digital \n\n');
fprintf('Escoja el tipo de modulación digital de interés \n');
fprintf('BPSK (1) BASK (2) M-ASK (3) BFSK (4)\n\n');
% Modulaciones BPSK, BASK, M-ASK
A = input ("Tipo de modulación = ");
if A == 3
    M= input ("Número de niveles para M-ASK = ");
end

switch (A)
    case (1)
        d = randint(1,N)*2-1; % Datos binarios polar (+1,-1) BPSK
    case (2)
        d = randint(1,N);      % Datos binarios (0,+1) BASK
    case (3)
        d = randint(1,N,M);    % Datos binarios polar (0,+1,...,M-1) M-ASK
    otherwise
        d = randint(1,N)*2-1; % Datos binarios polar (+1,-1) BFSK
endswitch

k=[0 N-1];          % Soporte de d, Instantes de muestras kT, k = 0 1 ...
N-1
de =repelem(d,up);   % pulsos rectangulares
tde=k(1):dt:k(2)+1-dt; % Soporte de impulsos
ni= find(tde == 0);
nf= find(tde == k(2));
de=de(ni:nf);        % datos de interés en instantes k
tde=tde(ni:nf);      % soporte de datos de interés
di=upsample(d,up);    % Símbolos (datos)
di=di(1:length(tde));

switch (A)
    case (1)
        pc=cos(2*pi*fc*tde); % portadora
        drx=de.*pc;          % señal modulada

```

```

    case (2)
    pc=cos(2*pi*fc*tde);      % portadora
    drx=de.*pc;               % señal modulada
    case (3)
    pc=cos(2*pi*fc*tde);      % portadora
    drx=de.*pc;               % señal modulada
    otherwise
    pc=cos(2*pi*(fc+1+de).*tde); % portadoras fc = [2 y 4] Hz
    drx=pc;                   % señal modulada
endswitch

v=[min(tde) max(tde) min(drx)-0.5 max(drx)+0.5];
subplot(3,2,1);
stem(tde,di,'linewidth',2);axis(v);grid;title('Símbolos Tx');
subplot(3,2,3);
plot(tde,de,'linewidth',2,tde,drx,'linewidth',3);axis(v);grid

switch (A)
    case (1)
        title('Señal BPSK');
    case (2)
        title('Señal BASK');
    case (3)
        title('Señal M-ASK');
    otherwise
        title('Señal BFSK');
endswitch

env=abs(hilbert(drx));      % envolvente
subplot(3,2,4);
plot(tde,env,'linewidth',2);axis(v);grid
title('Envolvente de la señal modulada');

%Demodulación
switch (A)
    case (1)                % demodulación coherente
        dm=drx.*pc;
        for r = 0:N-2
            dr(r+1)=mean(dm(r*up+1:up*(r+1)));
        end
    case (2)                % detección de envolvente
        for r = 0:N-2
            dr(r+1)=mean(env(r*up+1:up*(r+1)));
        end
    case (3)                % detección de envolvente
        for r = 0:N-2
            dr(r+1)=mean(env(r*up+1:up*(r+1)));
        end
end

```

```

otherwise                % demodulación no-coherente
dm=drx.*cos(2*pi*4*tde); % Usar fc correspondiente al símbolo 1
for r = 0:N-2
    dr(r+1)=sum(dm(r*up+1:up*(r+1)));
end
endswitch

subplot(3,2,5);
stem([0:length(dr)-1],dr,'linewidth',2);axis(v);grid
title('Símbolos recuperados');

```