TEORÍA DE LA COMUNICACIÓN

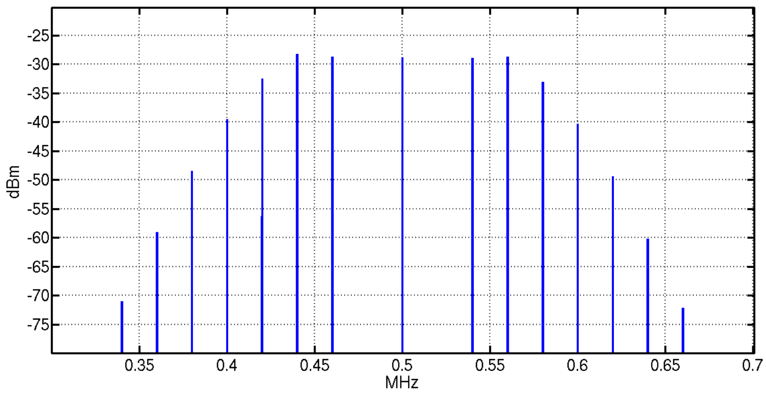
UPM. EUITT. DIAC Enero de 2013

Apellidos: ....

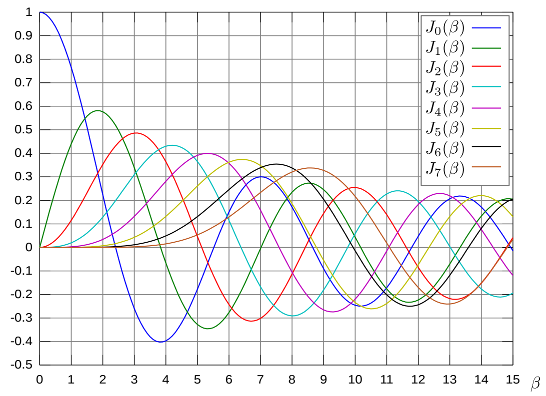
Nombre: .... DNI: ....

EJERCICIO 2 *(1 punto)*

Se dispone de un transmisor FM, pero se desconoce su desviación de frecuencia (Δf). Para caracterizar el transmisor de inyecta una señal senoidal de 20 KHz como moduladora y se observa en un analizador de espectros la siguiente figura.



Funciones de Bessel de primera especie:



- ¿Cual es la desviación de frecuencia (Δf) del transmisor?.

Se puede ver en el espectro que la J_1 se anula con lo que en vista del ancho de banda ocupado estamos en su primer nulo. $J_1(3{,}831705) = 0$ o de forma aproximada por la gráfica $J_1(3{,}8) = 0$.

De esta forma tenemos que $\beta = 3{,}831705 = \frac{\Delta f}{f_{mod}} = \frac{\Delta f}{20\ KHz}$, así que $\Delta f \approx 76{,}6\ KHz$

$$\boxed{\Delta f = 76{,}6\ KHz}$$

- ¿Cual es el ancho de banda ocupado por el transmisor para una señal de $W = 40\ KHz$?.

Sabemos que $D = \frac{\Delta f}{W} = \frac{76{,}6\ KHz}{40\ KHz} = 1{,}915$.

Así que el ancho de banda para 20 dB será aproximadamente $B = 2 \cdot W \cdot (D + 1) = 233{,}2\ KHz$.

$$\boxed{BW = 233{,}2\ KHz}$$

- ¿Cual es la potencia total transmitida por el transmisor de FM, en dBm?.

Se puede hacer sumando las potencias de las principales deltas en unidades naturales o teniendo en cuenta las funciones de Bessel.

Si lo hiciesemos con las funciones de Bessel. Como sabemos que estamos en $\beta = 3{,}831705$ (aproximado por la gráfica $\beta = 3{,}8$), solo necesitamos saber $J_0(3{,}831705) = -0{,}4028$ o mirarlo aproximadamente en la gráfica. $J_0(3{,}8) = -0{,}4$.

Si leemos el valor de la delta a la frecuencia de la portadora ($500\ KHz$) vemos que es $-28\ dBm$.

Así que la potencia total es $P_{total} = -28\ dBm - 20 \cdot \log 0{,}4028 \approx -20{,}1\ dBm$.

$$\boxed{P_{TX} = -20{,}1\ dBm}$$

Apellidos: ....

Nombre: ....DNI: ....

EJERCICIO 4 *(1 punto)*

Se desea diseñar a modo de prueba, un sistema de comunicaciones digitales basado en DVB-S.2 con una modulación con 16 símbolos cuya constelación **en emisión** se muestra en la *figura 1*. En el modelo del ensayo, el medio presenta una atenuación de sólo 20 dB.

La frecuencia de la portadora es de 1 GHz y se transmite una señal digital de R_b=2 Mbps. Realizada la prueba se observa que a la entrada del receptor hay una densidad espectral bilateral de ruido de No W/Hz.

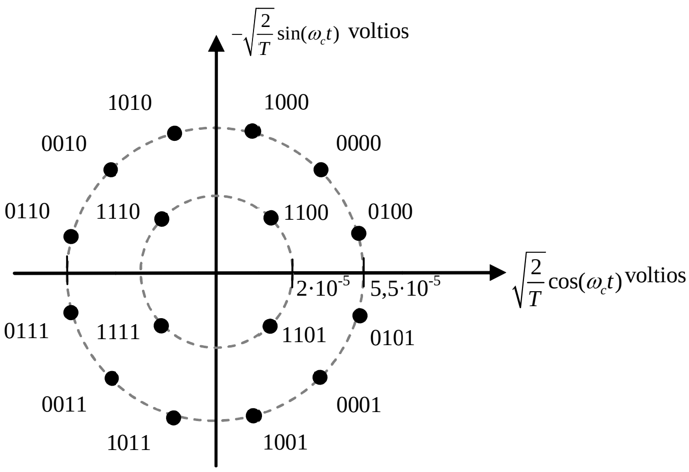


Figura 1

a) Escriba la expresión de la señal **en emisión**, $\mathbf{s_{1101}(t)}$ correspondiente al símbolo "1101" de la constelación.

b) Calcule la energía media por símbolo **en recepción**.

c) Calcule el número de ciclos de portadora que hay en cada período de símbolo recibido.

a) La constelación se encuentra normalizada en Energía.
El símbolo correspondiente a la secuencia 1101 está dentro de la circunferencia de radio menor, y se puede resolver con su módulo y fase en la forma general:

$$s_{1101}(t) = \sqrt{\frac{2\cdot E_1}{T_s}}\cos(\omega_c t + \theta_{1101})$$

Donde E_1 es la energía correspondiente a los símbolos contenidos en el radio menor. Por tanto:

$$\sqrt{E_1} = 2\cdot 10^{-5}$$

T_s es el tiempo de símbolo, y como cada símbolo tiene 4 bits y el régimen binario es R_b=2Mbps:

$$R_s = \frac{R_b}{4} \Rightarrow T_s = 4\cdot\frac{1}{R_b} = 4\cdot\frac{1}{2\cdot 10^6} = 2\mu s$$

Por otro lado:

$$\omega_c = 2\pi\cdot 10^9$$

$$\theta_{1101} = 315^{o} \equiv \frac{7\pi}{4}$$

Luego:

$$\boxed{s_{1101}(t)_{TX} = \sqrt{\frac{2}{2\cdot 10^{-6}}}2\cdot 10^{-5}\cos(2\pi 10^9 t + \frac{7\pi}{4})\quad V}$$

b) La energía media en recepción será la energía obtenida por la media de las energías.
En transmisión, las energías de los símbolos de cada radio:

$$\sqrt{E_1} = 2\cdot 10^{-5} \Rightarrow E_{1TX} = 0.4\cdot 10^{-9}\,J$$

$$\sqrt{E_2} = 5.5\cdot 10^{-5} \Rightarrow E_{2TX} = 3.025\cdot 10^{-9}\,J$$

La atenuación de 20 dB, para la energía será:

$$A_t = 20dB = 10\cdot\log a_t \Rightarrow a_t = 100$$

Luego en recepción:

$$\left.\begin{aligned} E_{1RX} &= \frac{E_{1TX}}{a_t} = 4\cdot 10^{-12}\,J \\ E_{2RX} &= \frac{E_{2TX}}{a_t} = 30.25\cdot 10^{-12}\,J \end{aligned}\right\} \overline{E_{RX}} = \frac{4\cdot E_{1TX} + 12\cdot E_{1TX}}{16} = \frac{E_{1TX} + 3\cdot E_{1TX}}{4} = \frac{4\cdot 10^{-12} + 3\cdot 3.25\cdot 10^{-12}}{4} \Rightarrow$$

$$\boxed{\overline{E_{RX}} = 23.68\cdot 10^{-12}\,J}$$

c) Fácilmente:

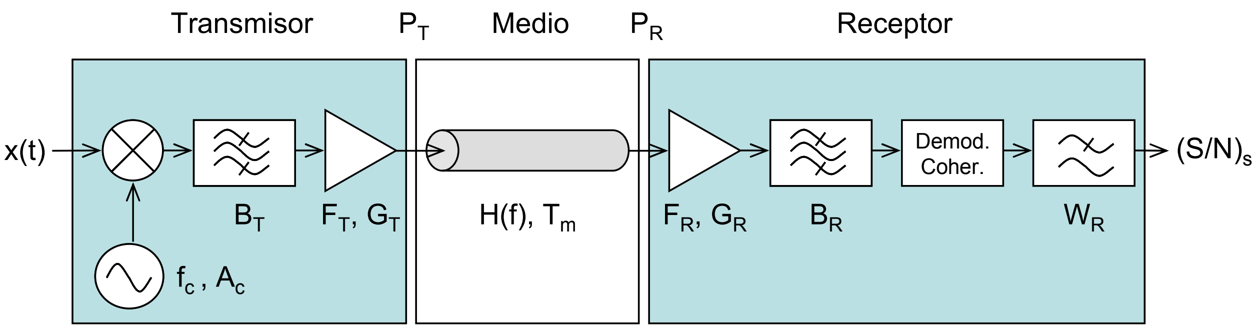
$$\left.\begin{aligned} 10^9 \quad ciclos &\rightarrow 1s \\ x \quad &\longrightarrow 2\cdot 10^{-6}s \end{aligned}\right\} \quad 2000 \quad ciclos \quad de \quad portadora / símbolo$$

Apellidos:..

Nombre: .... DNI:.................................

PROBLEMA 1 (3 *puntos*)

Una fuente de información genera una señal de potencia analógica, x(t), de 0 dBm de potencia media y 8 KHz de ancho de banda. Esta señal se introduce en un sistema de telecomunicación de banda estrecha compuesto por un transmisor, un medio de transmisión y un receptor como el mostrado en la figura siguiente:



En el transmisor, el oscilador genera una señal sinusoidal de 40 MHz y valor de pico igual a 0,1 voltios. El filtro paso banda es ideal, tiene una frecuencia central igual a 40 MHz y un ancho de banda, B_T, igual a 20 KHz. El amplificador tiene un factor de ruido, F_T, igual 12 dB.

Por su parte, el medio de transmisión consiste en un cable coaxial, a temperatura 17 ºC, y función de transferencia:

$$H(f) = \frac{10^{-5}}{1 + j\dfrac{f}{40 \cdot 10^{6}}}$$

En el receptor, el amplificador de entrada tiene un factor de ruido, F_R, de 9 dB. El filtro paso banda que hay posteriormente es ideal y tiene un ancho de banda, B_R, de 20 KHz. El filtro paso bajo situado al final, también es ideal y tiene un ancho de banda, W_R, de 8 KHz. El demodulador empleado es de tipo coherente.

a) Razone el tipo de modulación utilizado por este sistema de telecomunicación (10%).

b) Calcule el error máximo, Δf, que puede tener el oscilador del transmisor para que el sistema de telecomunicación siga funcionando correctamente (10%).

c) Calcule la ganancia del amplificador de salida del transmisor, G_T, para conseguir una potencia media de señal transmitida, P_T, igual a 30 dBm (20%).

d) Calcule la calidad de la señal a la salida del receptor, $(S/N)_S$, sabiendo que el factor de ruido de los amplificadores está medido para una T_0=300ºK. Notas: k (constante de Boltzmann) = $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/ºK; Tenga en cuenta, también, que se trata de un sistema de telecomunicación de banda estrecha (30%).

e) Obtenga la expresión analítica aproximada de la señal de información (es decir, sin ruido) recibida a la entrada del receptor, $y_R(t)$, teniendo en cuenta la influencia completa del medio (atenuación y retardos) (30%).

SOLUCIÓN

a) Razone el tipo de modulación utilizado por este sistema de telecomunicación (10%).

A la salida del transmisor, la señal tiene la forma siguiente:

$$y_T(t) = A\,x(t)\cos(\omega_c t + \theta_c)$$

Expresión, ésta, que se corresponde con la general de una modulación en doble banda lateral (DBL).

b) Calcule el error máximo, Δf, que puede tener el oscilador del transmisor para que el sistema de telecomunicación siga funcionando correctamente (10%).

La densidad espectral de potencia de la señal a la entrada del filtro tiene un ancho de banda de 2W=16 KHz, centrado en 40 MHz. El filtro paso banda del transmisor tiene un ancho de banda de 20 KHz y se encuentra centrado en 40 MHz. Queda, por tanto, un margen de guarda de 2 KHz por arriba y por abajo, lo que permitiría absorber un error en la frecuencia del oscilador de $\pm$2 KHz, sin afectar al espectro de la señal transmitida.

c) Calcule la ganancia del amplificador de salida del transmisor, G_T, para conseguir una potencia media de señal transmitida, P_T, igual a 30 dBm (20%).

En una modulación DBL como la del sistema, se tiene una densidad espectral de potencia a la salida del transmisor igual a:

$$G_T(f) = \frac{A_c^2}{4}\left[G_x(f - f_c) + G_x(f + f_c)\right]\cdot g_T$$

A partir de aquí, la potencia media de señal transmitida es:

$$p_T = \frac{A_c^2}{2} p_x \cdot g_T \quad \Rightarrow \quad g_T = \frac{2 p_T}{A_c^2 p_x} \quad \Rightarrow \quad G_T = P_T - P_x + 10\log\left(\frac{2}{A_c^2}\right) = 53\,dB$$

d) Calcule la calidad de la señal a la salida del receptor, $(S/N)_S$, sabiendo que el factor de ruido de los amplificadores está medido para una T_0=300ºK. Nota: k (constante de Boltzmann) = $1{,}38\cdot10^{-23}$ J/ºK, tenga en cuenta, también, que se trata de un sistema de telecomunicación de banda estrecha (30%).

La calidad de señal a la salida del receptor en una modulación DBL con un demodulador de tipo coherente es igual a:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_S = Z = \frac{p_R}{N_0\, W}$$

Calculamos la potencia recibida, p_R:

$$G_R(f) = G_T(f)\cdot|H(f)|^2 \quad \Rightarrow \quad p_R = \int_{-\infty}^{\infty} G_T(f)\cdot|H(f)|^2\, df$$

Al tratarse de una modulación de banda estrecha, la respuesta del medio es aproximadamente constante en la banda de paso de la señal modulada. Siendo así, el módulo de H(f) al cuadrado es aproximadamente constante e igual a su valor en $f=f_c$. En ese caso:

$$p_R = \int_{-\infty}^{\infty} G_T(f)\cdot|H(f)|^2\, df \approx p_T\cdot|H(f=f_c)|^2 \quad \Rightarrow \quad P_R = P_T + 10\log\left[|H(f=f_c)|^2\right]$$

$$H(f=f_c) = \frac{10^{-5}}{1+j} \quad \Rightarrow \quad |H(f=f_c)|^2 = \frac{10^{-10}}{2}$$

Lo que nos da una potencia de señal recibida de:

$$P_R = P_T + 10\log\left[|H(f=f_c)|^2\right] = 30\,dBm - 103\,dB = -73\,dBm = -103\,dBw \Rightarrow 5\cdot10^{-11}\,w$$

Para calcular la densidad espectral de ruido equivalente a la entrada del receptor, obtenemos primero la temperatura equivalente en el mismo punto. A su vez, esta temperatura equivalente es el resultado de la contribución del ruido del cable más la de los dos amplificadores.

De nuevo, consideramos que la respuesta del medio es aproximadamente constante en toda la banda de paso e igual a su valor en $f=f_c$.

A la frecuencia de portadora, la atenuación del cable, según lo que hemos visto más arriba, es de A_M=103 dB o, expresado en veces, $a_M=2\cdot10^{10}$. Por lo que, la contribución del ruido generado por los dos amplificadores y por el cable a la entrada del receptor es:

$$T_{eT} = T_0(f_T - 1)\frac{g_T}{a_m} << 1$$

$$T_{eM} = T_M(a_M - 1)\frac{1}{a_M} \approx T_M = 290$$

$$T_{eR} = T_0(f_R - 1) = T_0 \cdot 6{,}94 = 2082$$

Lo que nos da una densidad espectral de potencia de ruido equivalente a la entrada del receptor de:

$$N_0 = k\cdot(T_{eT} + T_{eM} + T_{eR}) = k\cdot(290 + 2082) = 3{,}275\cdot10^{-20}\ \frac{w}{Hz} \Rightarrow -194{,}8\,dBw/Hz$$

Finalmente:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_S(dB) = P_R - N_0 - 10\cdot\log W = -103 + 194{,}8 - 10\log(8\cdot10^3) = 52{,}8\,dB$$

e) Obtenga la expresión analítica aproximada de la señal de información (es decir, sin ruido) recibida a la entrada del receptor, $y_R(t)$, teniendo en cuenta la influencia completa del medio (atenuación y retardos) (30%).

La señal recibida está afectada por la atenuación y el retardo del medio. Este último, a su vez, se traduce en un retardo de fase (que afecta a la portadora) y un retardo de grupo (que afecta a la moduladora). De forma general:

$$y_R(t) = A_R\,x(t-\tau_g)\cos[\omega_c(t-\tau_f)+\theta_c]$$

La amplitud de la señal recibida, A_R, la calculamos a partir de la potencia media de señal recibida, que para una DBL es:

$$p_R = \frac{A_R^2}{2}p_x \Rightarrow A_R = \sqrt{\frac{2\cdot p_R}{p_x}} = 3{,}165\cdot10^{-4}\ v$$

El retardo de fase y el retardo de grupo lo calculamos a partir de la respuesta en fase de la función de transferencia del medio:

$$\theta(f) = -arctg\left(\frac{f}{f_c}\right) \Rightarrow \theta'(f) = \frac{d\theta}{df} = \frac{f_c}{f_c^2 + f^2} \text{ ; } siendo\ f_c = 40 \cdot 10^6\ Hz$$

De modo que:

$$\tau_f = -\left.\frac{\theta(f)}{2\pi f}\right|_{f=f_c} = \frac{1}{8 f_c} = 3{,}125\, nseg$$
$$\tau_g = -\left.\frac{\theta'(f)}{2\pi}\right|_{f=f_c} = \frac{1}{4\pi f_c} = 2\, nseg$$

Con lo que la expresión analítica de la señal recibida queda:

$$y_R(t) = 3{,}165 \cdot 10^{-4}\ x\left(t - 2 \cdot 10^{-9}\right) \cos\left[2\pi \cdot 40 \cdot 10^6 \left(t - 3{,}125 \cdot 10^{-9}\right) + \theta_c\right]$$

TEORÍA DE LA COMUNICACIÓN

UPM. EUITT. DIAC   Enero de 2013

Apellidos: ....

Nombre: .... DNI: ....

PROBLEMA 2 *(3 puntos)*

De un sistema de comunicación digital se saben los siguientes datos:

- En la figura 1 se presenta el diagrama de bloques del sistema. La parte del receptor aparece detallada.
- La modulación empleada es M-QAM.
- En la figura 2 se observan los diagramas de ojos que se recibirían (puntos C_I y C_Q de la figura 1) en ausencia de ruido.
- El modulador entrega al medio (punto A) una potencia media $p_{TX} = 540$ mW.
- El medio de transmisión atenúa 60 dB.
- Se filtra en coseno alzado, con factor de redondeo $\alpha = 0{,}2$.
- La frecuencia portadora es $f_c = 2{,}4$ GHz.
- Todo el ruido del sistema equivale a una contribución unilateral blanca aditiva $N_0 = 7{,}8 \cdot 10^{-16}$ W/Hz, a la entrada del receptor (punto B).
- Se requiere una calidad BER mejor que 10^{-9}.
- Suponga que todo el sistema está adaptado a $R = 50\ \Omega$.
- Se adjunta una tabla de la función complementaria del error *erfc*.
- Se adjuntan las fórmulas de la calidad, P_s, para M-QAM.
- Utilice las fórmulas y la tabla adjuntas para los cálculos de calidad.

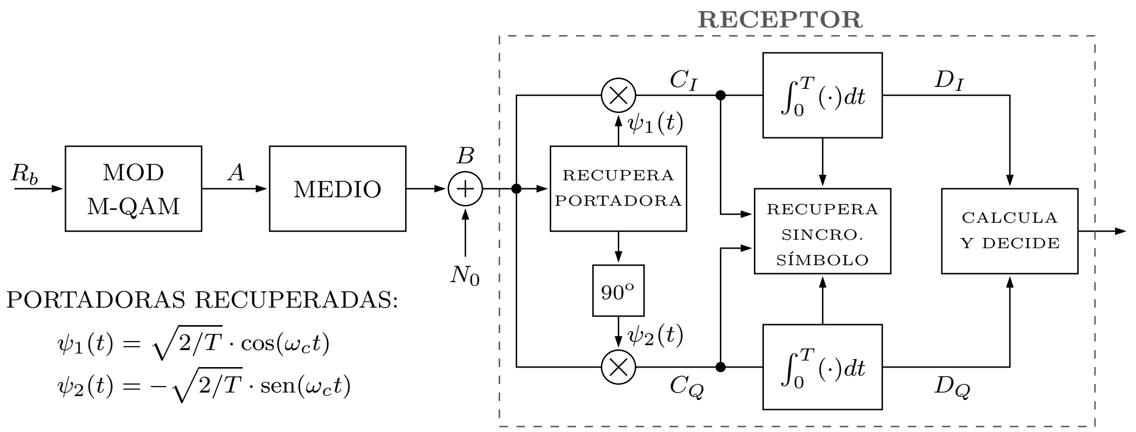


Figura 1: Diagrama de bloques del sistema de comunicación, con la parte del receptor detallada.

DIAGRAMA DE OJOS EN I

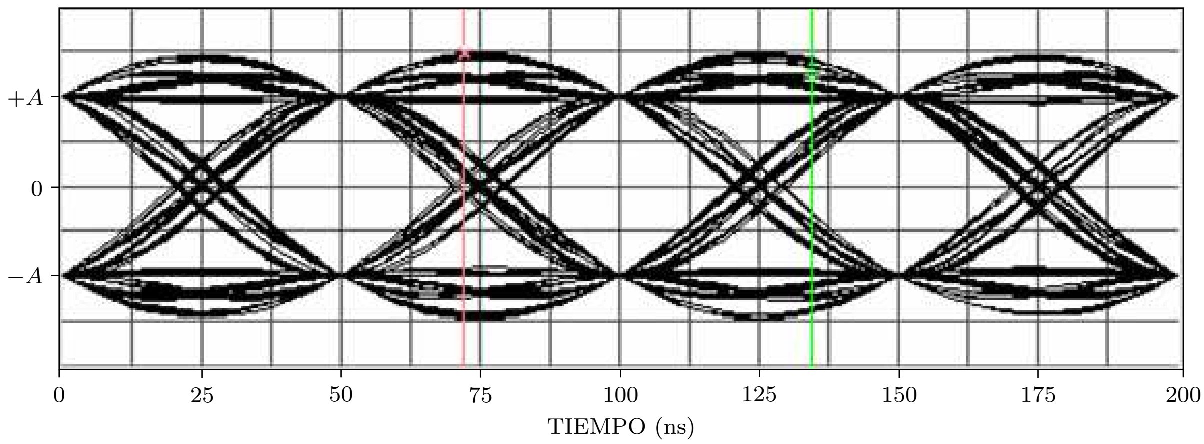


DIAGRAMA DE OJOS EN Q

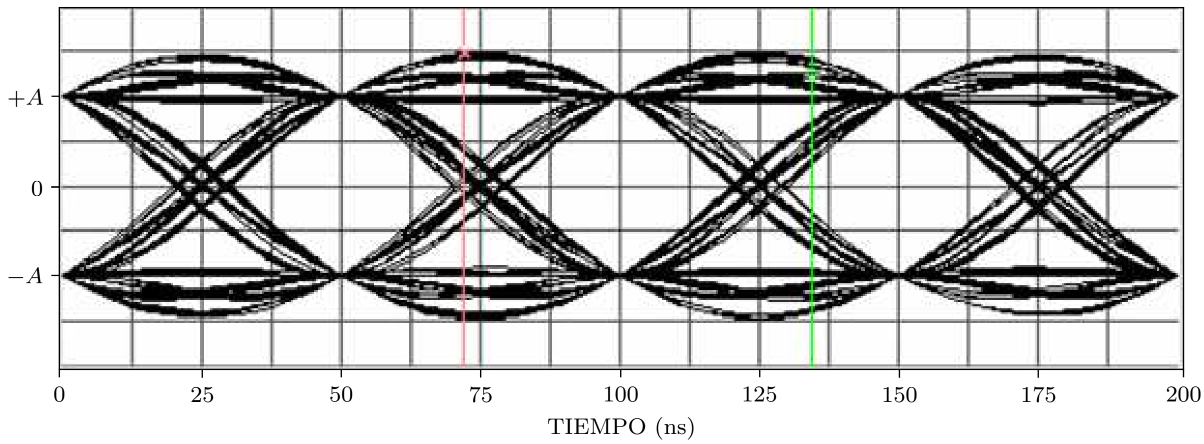


Figura 2: Diagrama de ojos en I y Q sin ruido. En los ejes verticales se representan voltios, en función de un parámetro A (desconocido).

1. Indique, razonadamente, cuál es la modulación que se utiliza. ¿Cuántos símbolos tiene? *(0,1 puntos.)*

2. Calcule el régimen simbólico y el régimen binario del sistema. *(0,3 puntos.)*

3. Calcule el ancho de banda que ocupa la señal modulada. *(0,3 puntos.)*

4. Dibuje la constelación recibida (punto B), antes de sumar el ruido. Utilice ejes ortonormales (con energía unitaria); indique las coordenadas de cada señal. Realice una asignación de código según Gray. *(0,8 puntos.)*

5. Se reciben en el punto B, ya con ruido, las señales $s_1(t) = 3{,}162277 \cdot 10^{-8} \cdot \cos(\omega_c t + \pi/6)$, y $s_2(t) = 2{,}440102 \cdot 10^{-9} \cdot \cos(\omega_c t + 5\pi/8)$ (en voltios, para t en segundos). ¿Qué decisiones tomará el receptor? *(0,6 puntos.)*

6. Estudie si el sistema cumple el objetivo de calidad especificado. *(0,9 puntos.)*

RESOLUCIÓN

1. En el diagrama de ojos tanto en I como en Q tenemos 2 niveles. Por lo tanto, la modulación es 4-QAM (o QPSK). Evidentemente, hay 4 símbolos.

2. Como $M = 4 = 2^2$, hay $k = 2$ bits por símbolo. El régimen simbólico se mide en cualquiera de los dos diagramas de ojos: entre instantes consecutivos de muestreo hay $T_s = 50$ ns.

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{50 \cdot 10^{-9}} = 20 \text{ Mbaudios}$$

$$R_b = k \cdot R_s = 2 \cdot 20 \cdot 10^6 = 40 \text{ Mbps}$$

3. Ancho de banda de la modulación lineal:

$$W = \frac{1}{2T_s} = \frac{R_s}{2}$$

$$B_{BB} = W(1+\alpha)$$

$$B_{QAM} = 2 \cdot B_{BB} = R_s(1+\alpha) = 20 \cdot 10^6(1+0{,}2) = 24 \text{ MHz}$$

4. A partir de la potencia media transmitida, calculamos la energía media por símbolo a la salida del transmisor (punto A):

$$E_A = p_{TX} \cdot T_s = \frac{540 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-6}} = 27 \cdot 10^{-9} \text{ J}$$

Llevamos la energía al receptor, pasando por el medio:

$$E_B = \frac{E_A}{a} = \frac{27 \cdot 10^{-9}}{10^6} = 27 \cdot 10^{-15} \text{ J}$$

En 4-QAM la energía media, E_s, es la energía de cualquier símbolo, E_B. Relacionamos la energía media por símbolo en el receptor, con la distancia entre símbolos contiguos (d):

$$E_s = (d/2)^2 + (d/2)^2 = d^2/2$$

$$d = \sqrt{2E_s} \approx 23{,}24 \cdot 10^{-8}$$

$$d/2 \approx 11{,}62 \cdot 10^{-8}$$

Los ejes son:

$$I = \sqrt{\frac{2R}{T_s}} \cos(\omega_c t)$$

$$Q = -\sqrt{\frac{2R}{T_s}} \operatorname{sen}(\omega_c t)$$

$$\sqrt{\frac{2R}{T_s}} = \sqrt{2 \cdot R \cdot R_s} \approx 44{,}72 \cdot 10^3$$

$$\omega_c = 2\pi \cdot 2{,}4 \cdot 10^9$$

Coordenadas y ejemplo de asignación (s_a a 45°, s_b a 135°, s_c a 225°, y s_d a 315°):

$$s_a = (+d/2, +d/2) \rightarrow 00$$

$$s_b = (-d/2, +d/2) \rightarrow 01$$

$$s_c = (-d/2, -d/2) \rightarrow 11$$

$$s_d = (+d/2, -d/2) \rightarrow 10$$

5. De forma general, hay que proyectar la señal recibida (s) sobre las portadoras recuperadas (ψ_1 y ψ_2), mediante el producto escalar. Es decir:

$$D_I = \langle s(t), \psi_1(t) \rangle$$

$$D_Q = \langle s(t), \psi_2(t) \rangle$$

Pero en este caso basta con ver en qué cuadrante está el ángulo: Para s_1 tenemos $\pi/6$ y estamos en el primer cuadrante, luego se decide s_a. Para s_2, con $5\pi/8$, pasamos al segundo cuadrante, s_b.

6. Como k es par, tenemos una fórmula cerrada. Calculamos el parámetro intermedio p:

$$p = \left(\frac{\sqrt{M} - 1}{\sqrt{M}} \right) \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{3 \log_2(M)}{2(M-1)} \frac{E_b}{N_0}} \right]$$

$$p = \left(\frac{\sqrt{4} - 1}{\sqrt{4}} \right) \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{3 \cdot 2}{2(4-1)} \frac{E_s}{k \cdot N_0}} \right]$$

$$p = \left(\frac{1}{2} \right) \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{27 \cdot 10^{-15}}{2 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-16}}} \right]$$

$$p \approx \left(\frac{1}{2} \right) \operatorname{erfc}[4{,}16]$$

$$p \approx \left(\frac{1}{2} \right) 4 \cdot 10^{-9}$$

$$p \approx 2 \cdot 10^{-9}$$

Ahora calculamos la P_s:

$$P_s = 1(1-p)^2 \approx 2 \cdot p = 4 \cdot 10^{-9}$$

Como la asignación es de Gray, la BER queda:

$$BER = P_b = \frac{P_s}{k} = \frac{4 \cdot 10^{-9}}{2} = 2 \cdot 10^{-9}$$

Luego no se cumple el objetivo de calidad (por poco).

Probabilidad de símbolo erróneo en una modulación M-QAM:

- $k = \log_2(M)$ impar:

$$P_s < 2 \text{ erfc}\left[\sqrt{\frac{3\log_2(M)}{2(M-1)}\frac{E_b}{N_0}}\right]$$

- $k = \log_2(M)$ par:

$$P_s = 1 - (1-p)^2\,; \quad p = \left(\frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M}}\right)\text{erfc}\left[\sqrt{\frac{3\log_2(M)}{2(M-1)}\frac{E_b}{N_0}}\right]$$

x	0	2	4	6	8
2,0	4,6777e-03	4,2805e-03	3,9142e-03	3,5765e-03	3,2656e-03
2,1	2,9795e-03	2,7164e-03	2,4747e-03	2,2528e-03	2,0494e-03
2,2	1,8628e-03	1,6921e-03	1,5358e-03	1,3929e-03	1,2623e-03
2,3	1,1432e-03	1,0345e-03	9,3543e-04	8,4522e-04	7,6314e-04
2,4	6,8851e-04	6,2072e-04	5,5917e-04	5,0335e-04	4,5276e-04
2,5	4,0695e-04	3,6550e-04	3,2802e-04	2,9416e-04	2,6360e-04
2,6	2,3603e-04	2,1119e-04	1,8882e-04	1,6869e-04	1,5059e-04
2,7	1,3433e-04	1,1974e-04	1,0665e-04	9,4918e-05	8,4413e-05
2,8	7,5013e-05	6,6610e-05	5,9102e-05	5,2401e-05	4,6424e-05
2,9	4,1098e-05	3,6355e-05	3,2134e-05	2,8382e-05	2,5049e-05
3,0	2,2090e-05	1,9466e-05	1,7141e-05	1,5082e-05	1,3260e-05
3,1	1,1649e-05	1,0226e-05	8,9696e-06	7,8617e-06	6,8854e-06
3,2	6,0258e-06	5,2694e-06	4,6044e-06	4,0202e-06	3,5074e-06
3,3	3,0577e-06	2,6636e-06	2,3185e-06	2,0166e-06	1,7526e-06
3,4	1,5220e-06	1,3207e-06	1,1452e-06	9,9220e-07	8,5900e-07
3,5	7,4310e-07	6,4234e-07	5,5482e-07	4,7885e-07	4,1296e-07
3,6	3,5586e-07	3,0642e-07	2,6365e-07	2,2667e-07	1,9472e-07
3,7	1,6715e-07	1,4337e-07	1,2288e-07	1,0524e-07	9,0055e-08
3,8	7,7004e-08	6,5793e-08	5,6171e-08	4,7919e-08	4,0847e-08
3,9	3,4792e-08	2,9612e-08	2,5183e-08	2,1400e-08	1,8171e-08
4,0	1,5417e-08	1,3071e-08	1,1073e-08	9,3727e-09	7,9276e-09
4,1	6,7000e-09	5,6582e-09	4,7746e-09	4,0258e-09	3,3919e-09
4,2	2,8555e-09	2,4021e-09	2,0191e-09	1,6958e-09	1,4232e-09
4,3	1,1935e-09	1,0000e-09	8,3732e-10	7,0052e-10	5,8561e-10
4,4	4,8917e-10	4,0829e-10	3,4052e-10	2,8378e-10	2,3630e-10
4,5	1,9662e-10	1,6347e-10	1,3580e-10	1,1273e-10	9,3503e-11
4,6	7,7496e-11	6,4179e-11	5,3108e-11	4,3913e-11	3,6281e-11
4,7	2,9953e-11	2,4708e-11	2,0366e-11	1,6774e-11	1,3805e-11
4,8	1,1352e-11	9,3279e-12	7,6586e-12	6,2831e-12	5,1506e-12
4,9	4,2189e-12	3,4531e-12	2,8240e-12	2,3077e-12	1,8844e-12

Cuadro 1: Función complementaria del error, $erfc(x)$.