TEORÍA DE LA COMUNICACIÓN

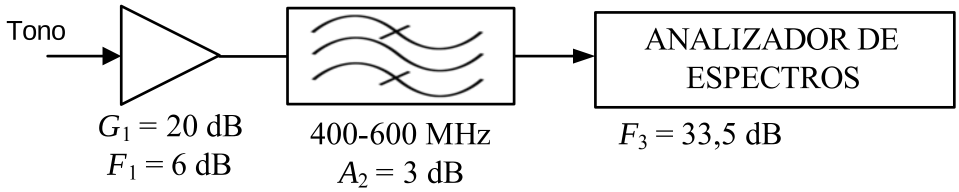
Examen extraordinario, julio de 2015

Apellidos: ....

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

EJERCICIO 1 (1,5 puntos)

Utilizando un analizador de espectros se realizan diversas medidas en el sistema que se muestra en la figura.



- El amplificador tiene una ganancia de 20 dB y una figura de ruido de 6 dB. Su punto de compresión a 1 dB, P_{1dB}, es 0 dBm (potencia expresada a la salida).
- El filtro paso banda atenúa 3 dB en su banda de paso (400-600 MHz). Fuera de la banda de paso la atenuación es infinita.
- El analizador de espectros tiene una figura de ruido de 33,5 dB.
- El sistema está a temperatura T_0 = 300 K y adaptado a R = 50 Ω.
- Constante de Boltzmann $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K

Nota. El apartado 3) puede realizarse incluso si no se han resuelto los anteriores.

1) Determinar la temperatura equivalente del conjunto (amplificador + filtro + analizador de espectros) a la entrada del sistema (0,4 puntos)

2) Se introduce en el sistema un tono de potencia -77 dBm y frecuencia 550 MHz; el ruido que acompaña al tono es despreciable. En la plantilla adjunta, dibujar el espectro que se visualizaría en la pantalla del analizador de espectros; fíjese en la configuración del equipo que se indica a la izquierda de la plantilla. No olvide pintar el ruido: debe calcular previamente la densidad espectral de ruido a la entrada del analizador y después la potencia de ruido. (0,8 puntos)

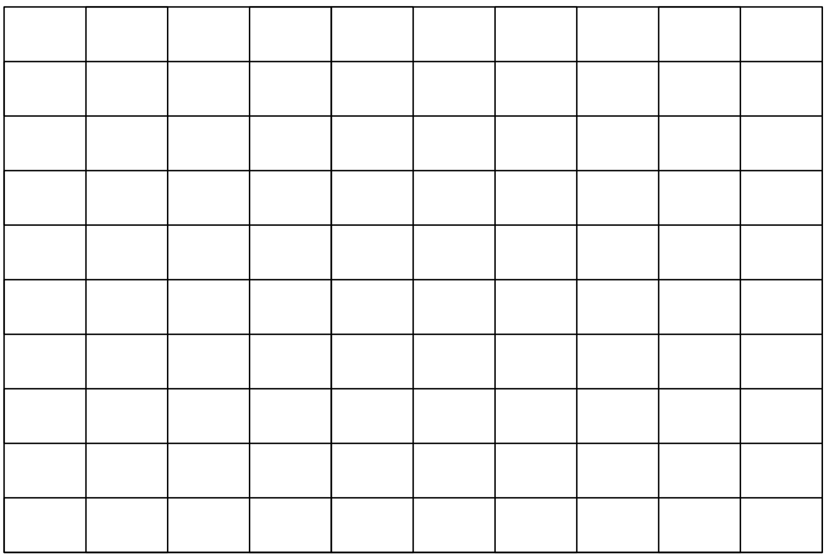
Frecuencia central: 530 MHz

SPAN: 100 MHz.

Factor de escala vertical: 10 dB/división

Nivel de referencia: -20 dBm

Ancho de banda de resolución: 1 MHz



3) Determinar la amplitud (en V) de un nuevo tono que haga trabajar al amplificador en su punto de compresión a 1 dB, P_{1dB}. (0,3 puntos)

Solución

1)

$$T_{e1} = (f_1 - 1)T_0 = 900 \text{ K}$$

$$T_{e2} = (a_2 - 1)T_0 = 300 \text{ K}$$

$$T_{e3} = (f_3 - 1)T_0 = \left(10^{3,35} - 1\right)T_0 = 671316 \text{ K}$$

$$T_e = 900 + \frac{300}{100} + \frac{671136}{100 \cdot \frac{1}{2}} = 14329 \text{ K}$$

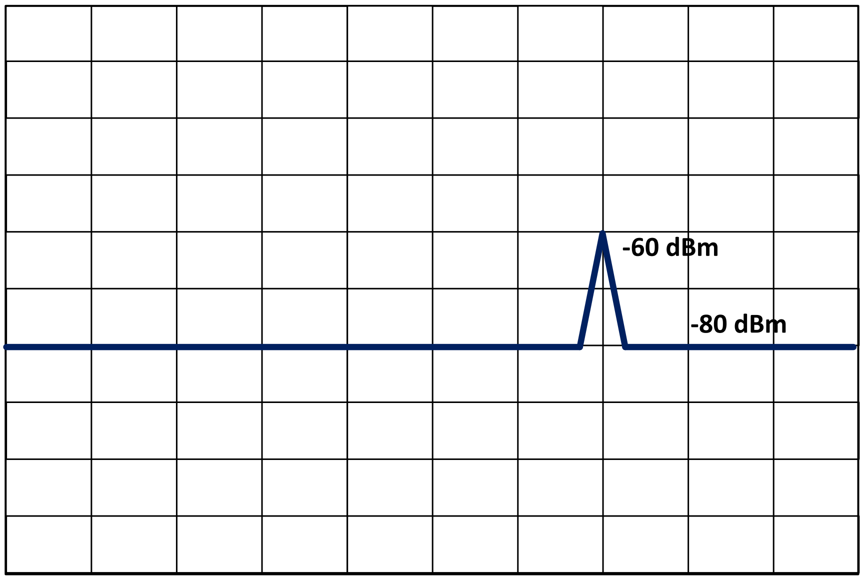
2) La potencia del tono a la entrada del analizador de espectros es: –77 dBm + 20 dB – 3 dB = –60 dBm.

La densidad espectral de ruido a la entrada del analizador de espectros es:

$$N_0 = k \cdot T_e \cdot g_1 \cdot \frac{1}{a_2} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 14329 \cdot 100 \cdot \frac{1}{2} = 9,9 \cdot 10^{-18} \text{ W/Hz}$$

y la potencia de ruido que se visualiza en el analizador de espectros:

$$N = N_0 \cdot RBW = 9,9 \cdot 10^{-12} \text{ W} \quad (-80 \text{ dBm})$$



3) En el P_{1dB} la ganancia es de 20 – 1 = 19 dB.

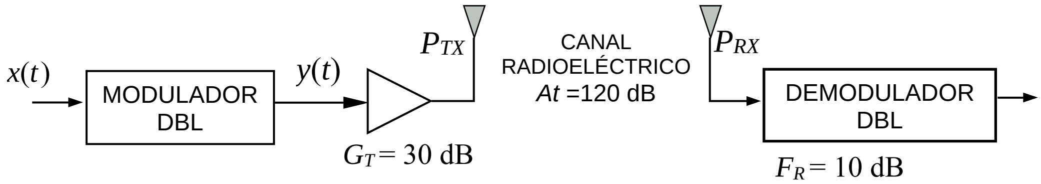
La potencia de un tono a la entrada será: 0 dBm – 19 dB = – 19 dBm ($1,26 \cdot 10^{-5}$ W), y su amplitud 35,5 mV.

Apellidos: ....

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

PROBLEMA 1 (3,5 puntos)

En la figura se muestran los elementos principales de un sistema de comunicaciones (transmisor y receptor) que emplea modulación DBL.



- La señal moduladora $x(t)$ se caracteriza por un valor de pico de 2 V, potencia media 16 mW y frecuencia máxima 12 kHz.
- La frecuencia de portadora es 3 MHz.
- El amplificador del transmisor es de ganancia G_T = 30 dB.
- La potencia media transmitida es P_{TX} = 53 dBm (tras el amplificador).
- El canal radioeléctrico atenúa la señal 120 dB.
- La antena del receptor capta un ruido térmico de temperatura T_a = 2300 K.
- La figura de ruido del receptor es F_R = 10 dB.
- El sistema está adaptado a $R = 50\ \Omega$.
- Constante de Boltzmann, $k = 1{,}38\cdot 10^{-23}$ J/K.

Notas:
- Tenga en cuenta que la señal moduladora no es una sinusoide.
- Los apartados 4-6) pueden realizarse incluso si no se han resuelto los anteriores.

1) Determinar:

- $\langle x^2(t)\rangle$, es decir el valor cuadrático medio de la señal moduladora $x(t)$.
- $\langle x_n^2(t)\rangle$, es decir el valor cuadrático medio de la señal moduladora normalizada $x_n(t)$.

(0,5 puntos)

2) Obtenga la expresión temporal de la señal modulada, $y(t)$, dejándola en función de $x(t)$. (0,8 puntos)

3) Calcular la potencia de una banda lateral, P_{1bl} (dBm) y la potencia equivalente de pico, PEP (dBm), de la señal transmitida (tras el amplificador). Indicar el ancho de banda ocupado por la señal transmitida. (0,5 puntos)

4) Calcular la potencia media recibida, P_{RX} (dBm). (0,3 puntos)

5) Determinar la calidad final, es decir la relación señal-ruido a la salida del demodulador. (0,8 puntos)

6) Suponga que el receptor se aleja del transmisor, lo que implica una mayor atenuación del canal radioeléctrico. Determinar cuál sería la atenuación máxima para garantizar una calidad mínima de 40 dB. (0,6 puntos)

Solución

1)

$$\langle x^2(t)\rangle = P_x \cdot R = 0{,}8 \text{ V}^2$$

$$\langle x_n^2(t)\rangle = \frac{\langle x^2(t)\rangle}{x_p^2} = \frac{0{,}8}{4} = 0{,}2 \text{ V}^2$$

2) La potencia media de la señal modulada, $y(t)$, es: $P_y = P_{TX} - G_T = 23 \text{ dBm } (200 \text{ mW})$.

Lo que permite calcular la amplitud de la señal modulada:

$$p_y = \frac{A^2}{2R}\langle x_n^2(t)\rangle = 0{,}2 \text{ W } \rightarrow A = 10 \text{ V}$$

La expresión temporal de la señal modulada es:

$$y(t) = A \cdot x_n(t) \cdot \cos\left(2\pi 3 \cdot 10^6 t\right) = A \cdot \frac{x(t)}{x_p} \cdot \cos\left(2\pi 3 \cdot 10^6 t\right) =$$

$$= 10 \cdot \frac{x(t)}{2} \cdot \cos\left(2\pi 3 \cdot 10^6 t\right) = 5 \cdot x(t) \cdot \cos\left(2\pi 3 \cdot 10^6 t\right)$$

3) La potencia de una banda lateral es la mitad de la potencia media transmitida, por lo tanto P_{1bl} = 50 dBm.

Para calcular la PEP hay que tener en cuenta la ganancia del amplificador (1000 veces):

$$PEP = \frac{A^2}{2R} \cdot 1000 = 1000 \text{ W } \ (60 \text{ dBm})$$

Ancho de banda = 24 kHz (el doble de la frecuencia máxima de la señal moduladora)

4)

$$P_{RX} = P_{TX} - At = 53 - 120 = -67 \text{ dBm } \left(2 \cdot 10^{-10} \text{ W}\right)$$

5)

$$T_e = T_0(f_R - 1) = 2700 \text{ K } (\text{temperatura equivalente del amplificador})$$

$$N_0 = k \cdot (T_a + T_e) = k \cdot 5000 = 6{,}9 \cdot 10^{-20} \text{ W/Hz}$$

$$z = \frac{p_R}{N_0 \cdot W} = \frac{2 \cdot 10^{-10}}{6{,}9 \cdot 10^{-20} \cdot 12000} = 241546$$

$$(s/n)_S = z = 241546 \rightarrow (S/N)_S = 53{,}8 \text{ dB}$$

6) Se requiere una z = 10000 (40 dB).

$$z = \frac{p_{RX}}{6{,}9 \cdot 10^{-20} \cdot 12000} = 10000 \rightarrow p_{RX} = 8{,}28 \cdot 10^{-12} \text{W } (-80{,}8 \text{ dBm})$$

$$At = P_{TX} - P_{RX} = 133{,}8 \text{ dB}$$

Apellidos:...

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

EJERCICIO 2 (1,5 puntos)

Se dispone de un sistema MIC-MDT (o bien PCM-TDM utilizando las siglas en inglés) compuesto por 30 canales vocales telefónicos, muestreados cada uno a 16 kHz y codificados con 16 bits por muestra. A la trama resultante se le añaden 2 canales de señalización de 8 bits cada uno y se envía todo por un canal de comunicaciones, en banda base, que puede modelarse mediante una función de transferencia en coseno alzado con factor de redondeo $\alpha = 0,2$.

1) Calcule régimen binario y el ancho de banda del sistema descrito (0,4 puntos).

2) Obtenga la máxima calidad de cuantificación (en dB) que podría obtenerse en cada canal vocal telefónico, suponiendo que las señales a la entrada fueran sinusoidales y se trabajase en la zona granular del cuantificador. Considere cuantificación uniforme (0,4 puntos).

3) Si el canal de comunicaciones tuviera un ancho de banda de B = 3609,6 kHz en lugar del obtenido en el apartado primero, calcule cuántos bits por muestra deberían utilizarse en el MIC para poder transmitir los 30 canales vocales telefónicos sin modificar la frecuencia de muestreo original (0,4 puntos).

4) Determine el parámetro "A" del cuantificador no uniforme Ley A que sería necesario utilizar en este último caso, de manera que la calidad de cuantificación de cada canal vocal telefónico no se vea alterada. Si no ha resuelto el apartado anterior, tome b = 12 bits (0,3 puntos).

Solución

1) $R_B = (16 \cdot 30 + 8 \cdot 2) \cdot f_s = (16 \cdot 30 + 8 \cdot 2) \cdot 16$ kHz = 7936 kbps

El ancho de banda del canal, banda base, en coseno alzado con $\alpha = 0,2$ es:

$B = (R_B / 2) \cdot (1 + \alpha) = 4761,6$ kHz

2) Siempre que se trabaja en la zona granular del cuantificador, se cumple que el valor de pico de la señal a cuantificar es menor o igual que el fondo de escala del cuantificador: $x_p \leq x_{sc}$, de forma que:

$(S/N)_Q \leq 3\, M^2 \langle x_n^2 \rangle = 3 \cdot 2^{2b} \cdot 0,5$, o expresado en dB: $(S/N)_Q$ (dB) $\leq 1,76 + 6,02\, b$

Así pues: $(S/N)_Q$ (dB) $\leq 1,76 + 6,02 \cdot 16 = 98$ dB

Expresado en veces, sale: $(S/N)_Q \leq 3 \cdot 2^{2 \cdot 16} \cdot 0,5 = 0,644 \cdot 10^{10}$ veces

3) Para que B = 3609,6 kHz, sería necesario una $R_B = 2B / (1 + \alpha) = 6016$ kbps

Como, $R_B = (b \cdot 30 + 8 \cdot 2) \cdot f_s \rightarrow b = (R_B / f_s - 16) / 30 = 12$ bits

4) Al reducir de 16 a 12 el número de bits del cuantificador, se pierden 6·4 = 24 dB de calidad en cada canal vocal telefónico. De ese modo, para mantener la calidad de cuantificación necesitaríamos un compresor que compensara esa pérdida mediante una ganancia de compresión de, al menos, 24 dB.

Teniendo en cuenta que se trata de canales vocales telefónicos, la mejora de un compresor Ley A es de: G_c (dB) = 20 log (A / (1+ ln A)), que para un valor estándar de A = 87,6 nos da la mejora de 24 dB que se pretende compensar.

TEORÍA DE LA COMUNICACIÓN

Examen extraordinario, julio de 2015

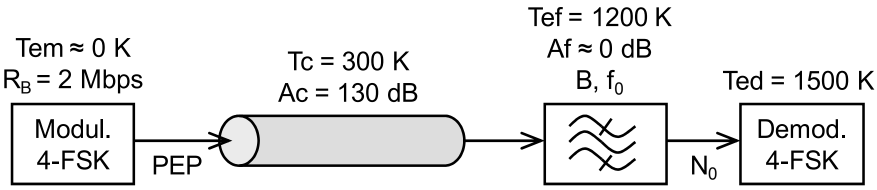
TSC

Apellidos: ....

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

PROBLEMA 2 (3,5 puntos)

Se quiere analizar el sistema de comunicaciones 4-FSK mostrado en la siguiente figura:



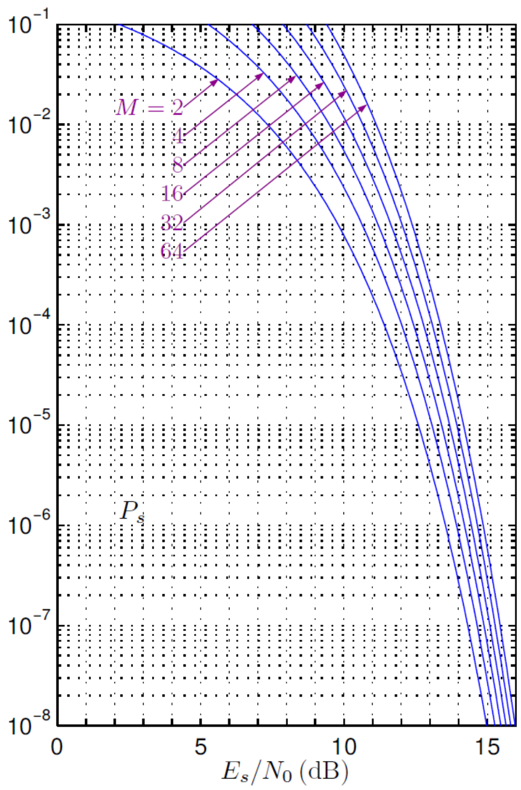
El transmisor se compone de un modulador 4-FSK realizado con osciladores coherentes en fase. Tiene un nivel de ruido despreciable y una potencia de pico, *PEP*, de salida, a determinar.

El medio de transmisión es un cable coaxial de 130 dB de atenuación, perfectamente adaptado, que se encuentra a una temperatura física de 300 K.

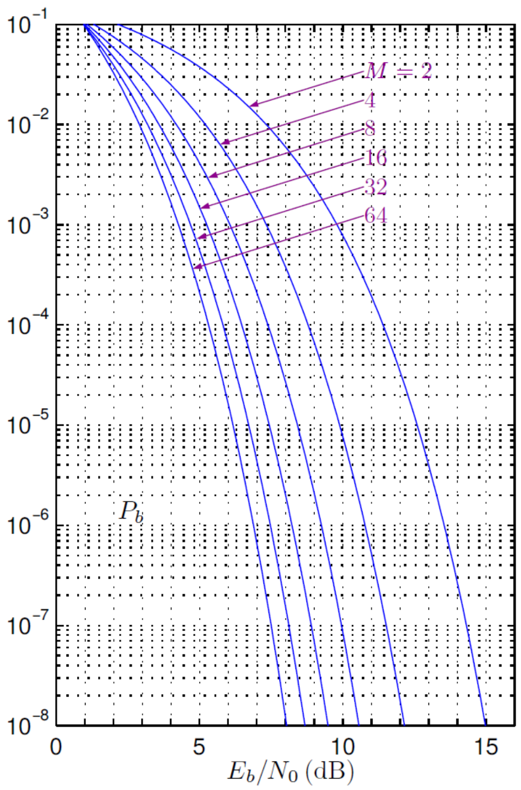
El receptor tiene en su entrada un filtro paso banda ideal de ancho de banda *B*, a determinar, con atenuación despreciable en la banda de paso y temperatura equivalente de ruido igual a 1200 K.

El demodulador 4-FSK está realizado con un detector óptimo y tiene una temperatura equivalente de ruido de 1500 K.

Probabilidad de error de símbolo para un detector óptimo M-FSK coherente



Probabilidad de error de bit para un detector óptimo M-FSK coherente



1) Calcule el mínimo ancho de banda posible, B, que puede tener el filtro paso banda del receptor para que el sistema funcione correctamente (0,5 puntos).

2) Calcule la temperatura equivalente de ruido, T_{eq}, de todo el sistema a la entrada del demodulador 4-FSK y la densidad espectral de ruido equivalente total, N_0, en ese mismo punto (0,8 puntos).

3) Calcule la potencia de pico, PEP, que debería entregar el transmisor para que la probabilidad de error de bit del detector 4-FSK sea mejor que $5 \cdot 10^{-7}$ (utilice las gráficas suministradas) (1 punto).

4) Si se cambiase el tipo de modulación a una 2-FSK, manteniendo el resto de parámetros del sistema igual, obtenga qué nueva probabilidad de error de bit se obtendría en el detector en ese caso (0,6 puntos).

5) En este último caso (2-FSK), elija la frecuencia de los osciladores que deberían emplearse en el transmisor si la frecuencia central del filtro paso banda del receptor fuera $f_0 = 910$ MHz. Determine, asimismo, qué ancho de banda mínimo, B, sería necesario que tuviera ese filtro ahora, para que el sistema funcionase correctamente (0,6 puntos).

Solución

1) El mínimo ancho de banda posible se corresponde con el ancho de banda de Nyquist del sistema, que para una 4-FSK con osciladores coherentes en fase es igual a:

   $B_{min} = B_{NYQ} = (M+1)\ R_s / 2 = 5 \cdot (R_B /2) / 2 = 2{,}5$ MHz

2) $T_{eq} = T_c\ (A\text{-}1)/A + T_{ef} /1 + T_{ed} \approx 300 + 1200 + 1500 = 3000$ K

   $N_0 = k\ T_{eq} = 4{,}14 \cdot 10^{-20}$ W/Hz, o también: -193,8 dBW/Hz

3) De las gráficas del enunciado se tiene que para obtener una probabilidad de error de bit mejor que $5 \cdot 10^{-7}$ se precisa un (E_B/N_0) superior a 11 dB a la entrada del detector.

   Como, N_0 = -193,8 dBW/Hz, se tiene que $E_{B,RX} > -182{,}8$ dBJ

   Por otro lado: $P_{TX} = P_{RX}\ A = E_{B,RX}\ R_B\ A$, de donde:

   $P_{TX} > E_{BRX}$ (dBJ) + 10 log (R_B) + A (dB) = -182,8 + 63 + 130 = 10,2 dBW

   Al tratarse de una modulación FSK, $PEP = P_{TX} > 10{,}2$ dBW

   Expresado en W: PEP > 10,4 W

4) Si el resto de parámetros del sistema (PEP, R_B, A, N_0) no cambia, se tendría la misma (E_B/N_0) a la entrada del detector.

   De ese modo, puede obtenerse la probabilidad de error de bit leyendo, directamente, la ordenada de la curva 2-FSK que le corresponde a una abscisa, (E_B/N_0), igual a 11dB. El resultado es: $P_B = 2 \cdot 10^{-4}$.

5) Sabemos que la separación entre frecuencias de una FSK ortogonal, con osciladores coherentes en fase, es igual a R_s / 2. Así pues, si centramos el espectro de la señal en f_0, la frecuencia de los osciladores de una modulación 2-FSK quedaría de la siguiente manera:

   $f_1 = f_0 - R_S/4 = f_0 - R_B/4 = 909{,}5$ MHz

   $f_2 = f_0 + R_S/4 = f_0 + R_B/4 = 910{,}5$ MHz

   Siendo necesario un ancho de banda mínimo de transmisión de:

   $B_{min} = B_{NYQ} = 3\ R_S / 2 = 3\ R_B / 2 = 3$ MHz

   Que es, a su vez, el mínimo ancho de banda necesario en el filtro del receptor.