



TEORÍA DE LA COMUNICACIÓN

Examen parcial, abril de 2017

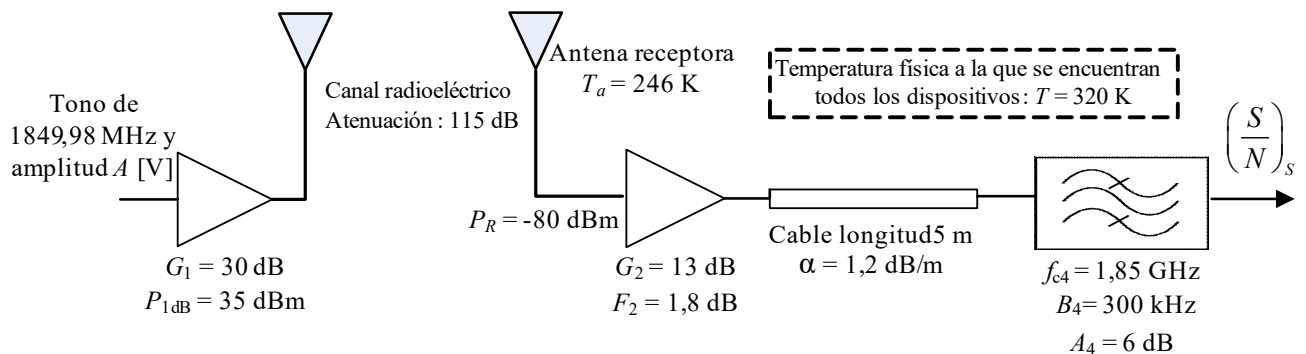
TSC

PROBLEMA 1. El sistema representado en la figura consta de los siguientes elementos:

- Transmisor. Amplificador de ganancia nominal $G_1 = 30$ dB (ganancia de pequeña señal) y potencia a la salida en el punto de compresión a 1 dB, $P_{1dB} = 35$ dBm.
- Cadena receptora:
 - Antena que capta un ruido $T_a = 246$ K.
 - Amplificador de ganancia $G_2 = 13$ dB y figura de ruido $F_2 = 1,8$ dB.
 - 5 m de cable de atenuación específica 1,2 dB/m.
 - Filtro paso banda centrado en 1,85 GHz y ancho de banda 300 kHz. La atenuación en la banda de paso es 6 dB.

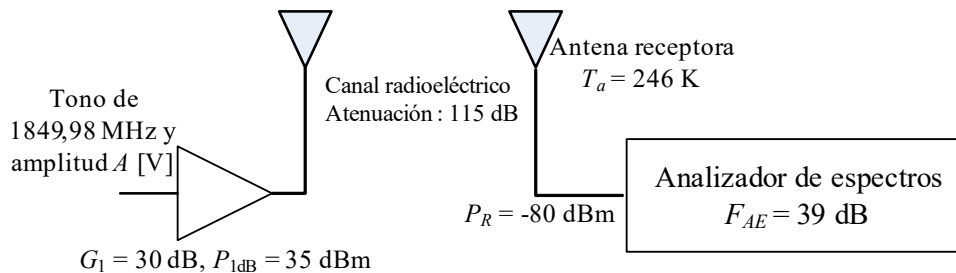
Adicionalmente se conocen los siguientes datos:

- A la entrada del amplificador del transmisor se introduce un tono de 1849,98 MHz.
- La atenuación del canal radioeléctrico es 115 dB.
- La potencia recibida en la antena es -80 dBm.
- Toda la cadena receptora se encuentra a temperatura física $T = 320$ K. Esto afecta únicamente al cálculo de temperaturas equivalentes de los elementos pasivos: cable y filtro.
- Sistema adaptado a 50Ω .
- Constante de Boltzmann $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K.



Nota. Los apartados pueden resolverse de manera independiente.

- 1) Calcular la relación señal a ruido a la salida del sistema, $(S/N)_s$. (50%)
- 2) Calcular la amplitud de pico, A [V], del tono de 1849,98 MHz para obtener en el receptor la potencia de -80 dBm. (20%)
- 3) Se conecta un analizador de espectros a la salida de la antena receptora, en sustitución de la cadena receptora. La figura de ruido del analizador es 39 dB. Dibuje la imagen aproximada que se visualizaría, teniendo en cuenta la configuración del equipo de medida. (30%)



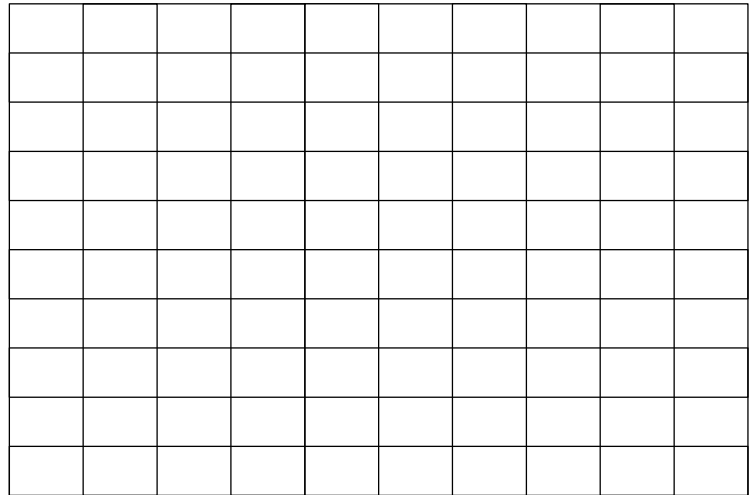
Frecuencia central: 1850 MHz

SPAN: 100 kHz.

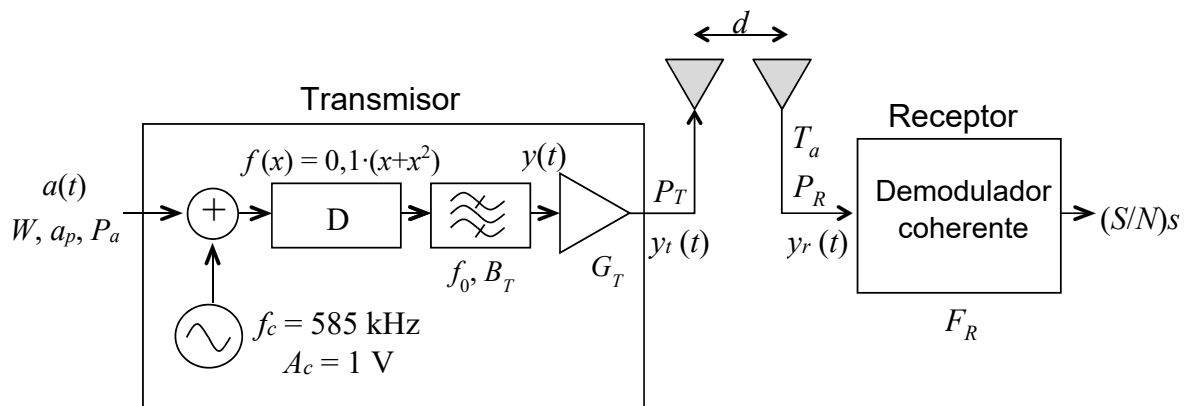
Factor de escala vertical: 10
dB/div

Nivel de referencia: -40 dBm

Ancho de banda de resolución
(RBW): 3 kHz



PROBLEMA 2. Se dispone de un sistema de telecomunicación de modulación analógica como el de la figura, donde el receptor se ha implementado utilizando un demodulador de tipo coherente. La señal moduladora, $a(t)$, tiene un ancho de banda $W = 5$ kHz, un valor de pico $a_p = 100$ mV, y una potencia media total $P_a = 0,1$ mW, medida ésta sobre una resistencia de 50Ω . Para modular, se emplea una señal sinusoidal de frecuencia $f_c = 585$ kHz y amplitud de pico $A_c = 1$ V.



En el transmisor, el dispositivo D es un sistema no lineal con una función característica del tipo $f(x) = 0,1 \cdot (x + x^2)$, y el filtro paso banda tiene una función de transferencia ideal, centrada en f_0 , sin atenuación en la banda de paso, y ancho de banda B_T .

En el receptor, la temperatura equivalente de ruido de la antena, T_a , es 12300 K, y el receptor tiene una figura de ruido, F_R , no conocida a priori.

- 1) Razone el tipo de modulación analógica que se obtiene a la salida del transmisor y seleccione los valores de frecuencia central, f_0 , y ancho de banda, B_T , del filtro paso banda, necesarios para que el sistema funcione correctamente. (10%)
- 2) Determine la ganancia, G_T , del amplificador para conseguir una potencia media de señal a la salida del transmisor, P_T , igual a 10 dBW, para una impedancia característica de 50Ω . Expresé el resultado en dB. (30%)
- 3) Calcule la relación señal a ruido dentro de la banda de trabajo a la entrada del receptor, $(S/N)_R$, si la atenuación del canal puede expresarse como: A [dB] = $66,6 + 20 \cdot \log d$ [km] + $20 \cdot \log f$ [MHz]. Tome la potencia de salida del transmisor, P_T , del apartado anterior, y considere que la distancia que separa el transmisor del receptor, d , es igual a 40 km (Nota: tenga en cuenta que el ruido generado por el receptor sólo está presente en su salida, pero no en su entrada). (20%)
- 4) Indique qué figura de ruido (F_R) máxima debe tener el receptor para que la calidad a su salida, $(S/N)_S$, alcance los 40 dB. (40%)

SOLUCIONES

Problema 1

1) Amplificador: $T_{e2} = T_0 \cdot (f_2 - 1) = 154$ K. La conversión de factor de ruido a temperatura equivalente de ruido debe hacerse siempre con T_0 .

Cable con atenuación 6 dB (4 veces). $T_{e3} = T \cdot (a_3 - 1) = 320 \cdot (4 - 1) = 960$ K. La fórmula de temperatura equivalente para dispositivos pasivos utiliza la temperatura física a la que se encuentra dicho dispositivo.

Filtro con atenuación 6 dB (4 veces). $T_{e4} = T \cdot (a_4 - 1) = 320 \cdot (4 - 1) = 960$ K. La fórmula de temperatura equivalente para dispositivos pasivos utiliza la temperatura física a la que se encuentra dicho dispositivo.

Se aplica fórmula de Friis y se le suma la temperatura captada por la antena:

$$T_{eT} = T_a + T_{e2} + T_{e3} / g_2 + T_{e4} \cdot a_3 / g_2 = 246 + 154 + 960/20 + 960 / (20 \cdot 1/4) = 640$$
 K

La relación señal-ruido se calcula con datos a la entrada:

$$(s/n)_s = p_r / (k \cdot T_{eT} \cdot B) = 10^{-11} / (1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 640 \cdot 3 \cdot 10^5) = 10^{-11} / 2,65 \cdot 10^{-15} = 3774$$

$$(S/N)_S = 35,8 \text{ dB}$$

Nota. También podía haberse calculado la potencia de señal a la salida pero, en ese caso, también hay que calcular el ruido realmente presente a la salida. Se trata, no obstante, de un cálculo superfluo pues se multiplica tanto numerador y denominador por el mismo número: la ganancia de los 3 elementos (amplificador + cable + filtro).

2) La potencia a la salida del amplificador del transmisor debe ser $-80 \text{ dBm} + 115 \text{ dB} = 35 \text{ dBm}$. Esa potencia es justamente el punto de compresión a 1 dB; en esa zona de trabajo la ganancia es 1 dB inferior a la nominal, $G = 30 - 1 = 29 \text{ dB}$. Luego la potencia a la entrada es $35 - 29 = 6 \text{ dBm}$.

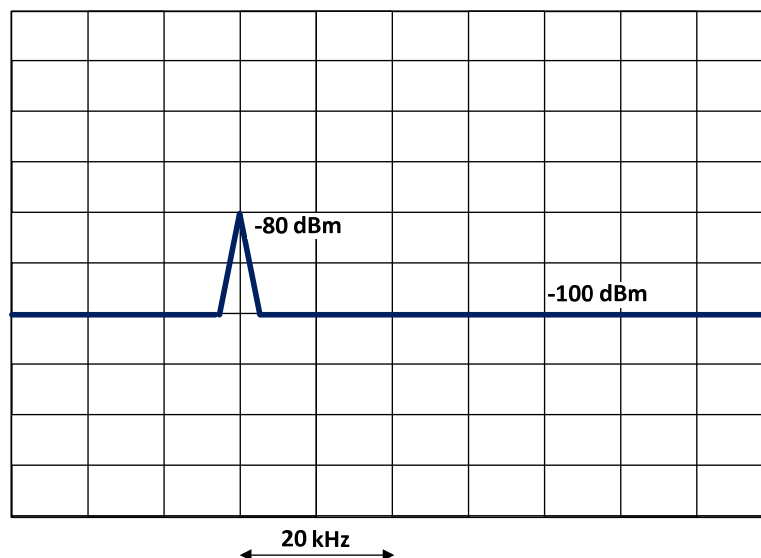
La amplitud de pico de un tono de potencia 6 dBm es 0,631 V:

$$10 \log \left(\frac{0,631^2}{2 \cdot 50} \right) + 30 = 6 \text{ dBm}$$

3) La temperatura equivalente del analizador de espectros es $T_{AE} = 2382685$ K. Luego la potencia de ruido que se visualiza es:

$$n = k \cdot (T_a + T_{AE}) \cdot RBW = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 2382931 \cdot 3000 = 9,86 \cdot 10^{-14} \text{ W} \rightarrow N = -100 \text{ dBm}$$

Nota. En los cálculos podría haberse despreciado T_a , por ser muy inferior a la temperatura del analizador.



Problema 2

1) A la salida del sistema no lineal, D, aparecen los siguientes términos: la moduladora, la portadora, la moduladora al cuadrado, la portadora al cuadrado, y el producto de $a(t)$ por la portadora. De todos ellos, **sólo uno**: el producto de la moduladora por la portadora, representa una modulación. Por ende, para que el sistema funcione correctamente, f_0 debe coincidir con f_c y B_T debe coincidir con $2W$. En ese caso, también atravesará el filtro el término que contiene sólo la portadora, f_c , y, consiguientemente, la modulación resultante será una AM. Así pues, la solución es: $f_c = 585$ kHz, y $B_T = 2W = 10$ kHz.

2) A la salida del filtro paso banda se tiene la expresión típica de una modulación AM:

$$y(t) = A_c(1 + m \cdot \overline{a(t)}) \cdot \cos(\omega_c t)$$

con:

$$\overline{a(t)} = \frac{a_p}{a_p}$$
$$\langle \overline{a(t)}^2 \rangle = \frac{P_a R}{a_p^2} = 0,5$$

Si denominamos a_1 y a_2 a los coeficientes del polinomio característico del dispositivo no lineal, D, después de desarrollar términos, tenemos:

$$A_c = 1 \cdot a_1 = 0,1$$
$$m = \frac{2 \cdot a_2 \cdot a_p}{a_1} = \frac{2 \cdot 0,1 \cdot 0,1}{0,1} = 0,2$$

De donde podemos sacar la potencia media de $y(t)$:

$$P_y = \frac{A_c^2}{2 \cdot R} (1 + m^2 \langle \overline{a(t)}^2 \rangle) = 1,02 \cdot 10^{-4} W \rightarrow -39,9 \text{ dBW}$$

De manera que para conseguir una potencia de transmisión de 10 dBW, se precisa un amplificador de ganancia: $G_T = P_T - P_y = 49,9 \text{ dB} \approx 50 \text{ dB}$

3) La atenuación del canal para una $d = 40$ km y una $f = 0,585$ MHz, es:

$$A(\text{dB}) = 66,6 + 20 \cdot \log(40) + 20 \cdot \log(0,585) = 94 \text{ dB}$$

Lo que nos da una potencia de señal a la entrada del receptor igual a:

$$P_R = P_T - A = -84 \text{ dBW} = -54 \text{ dBm}$$

La potencia de ruido dentro de la banda de trabajo, a la entrada del receptor, es la captada por la antena:

$$N_R = k \cdot T_a \cdot B = k \cdot T_0 \cdot 41 \cdot B$$

donde se ha expresado la temperatura equivalente de ruido de la antena como 41 veces T_0 , al objeto de facilitar los cálculos posteriores. En unidades logarítmicas, el resultado es:

$$N_R = -174 \text{ dBm/Hz} + 10 \cdot \log(41 \cdot 10^4) = -118 \text{ dBm}$$

De donde, la calidad, expresada en dB, es igual a $(S/N)_R = P_R - N_R = 64 \text{ dB}$.

Nota. El valor de densidad espectral de ruido igual a -174 dBm/Hz, empleado en la resolución, suele encontrarse muy frecuentemente en la literatura especializada. Es el resultado de:

$$10 \log(k \cdot T_0) = -204 \text{ dBW/Hz} = -174 \text{ dBm/Hz}, \text{ con } T_0 = 290 \text{ K}$$

En la asignatura utilizamos $T_0 = 300 \text{ K}$, con el que resulta una densidad espectral algo superior, $-173,8$ dBm/Hz. Eso puede explicar algunas pequeñas divergencias en los resultados numéricos finales, en función del método utilizado, pero que no deberían superar una o dos décimas de dB.

4) La calidad a la salida de un demodulador coherente para una modulación AM es igual a:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_s = z \cdot \frac{m^2 \langle \overline{a(t)^2} \rangle}{1 + m^2 \langle \overline{a(t)^2} \rangle} = z \cdot 0,0196 \rightarrow 40 \text{ dB}$$

Como la calidad a la salida debe ser 40 dB, necesitamos una Z superior a 57 dB.

A su vez, para una potencia recibida dada, dicha Z nos obliga a una N_0 inferior a:

$$N_0 = P_R(\text{dBm}) - Z(\text{dB}) - 10 \cdot \log(W(\text{Hz})) = -54 \text{ dBm} - 57 \text{ dB} - 37 \frac{\text{dB}}{\text{Hz}} = -148 \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}}$$

Esta densidad espectral de ruido blanco es la que generaría una resistencia térmica equivalente a temperatura $T_{eq} = m \cdot T_0 = N_0/k$, de donde m queda:

$$m(\text{dB}) = N_0 \left(\frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} \right) - 10 \cdot \log(k \cdot T_0) = -148 \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} + 174 \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} = 26 \text{ dB}$$

Resultando una $T_{eq, total}$ (antena + receptor) de 398 veces T_0 .

Como la temperatura equivalente de la antena aporta 41 veces T_0 , el receptor no podrá aportar más de $398 - 41 = 357$ veces T_0 , resultando un factor de ruido, f_R , y, por ende, una figura de ruido, F_R , del receptor igual o inferior a:

$$f_R = 1 + \frac{T_e}{T_0} = 1 + \frac{357 \cdot T_0}{T_0} = 358 \text{ veces} \rightarrow F_R = 25,5 \text{ dB}$$