

### 3.5. Ejercicios

**Ejercicio 3.1** Una misma señal de entrada se aplica a 4 moduladores analógicos diferentes. Se monitoriza la respuesta en frecuencia a la salida de los cuatro moduladores, dando lugar a los cuatro espectros representados en la Figura 3.46. Tenga en cuenta que en el eje de abscisas se representa frecuencia en kHz, y que cada subfigura tiene distintas escalas.

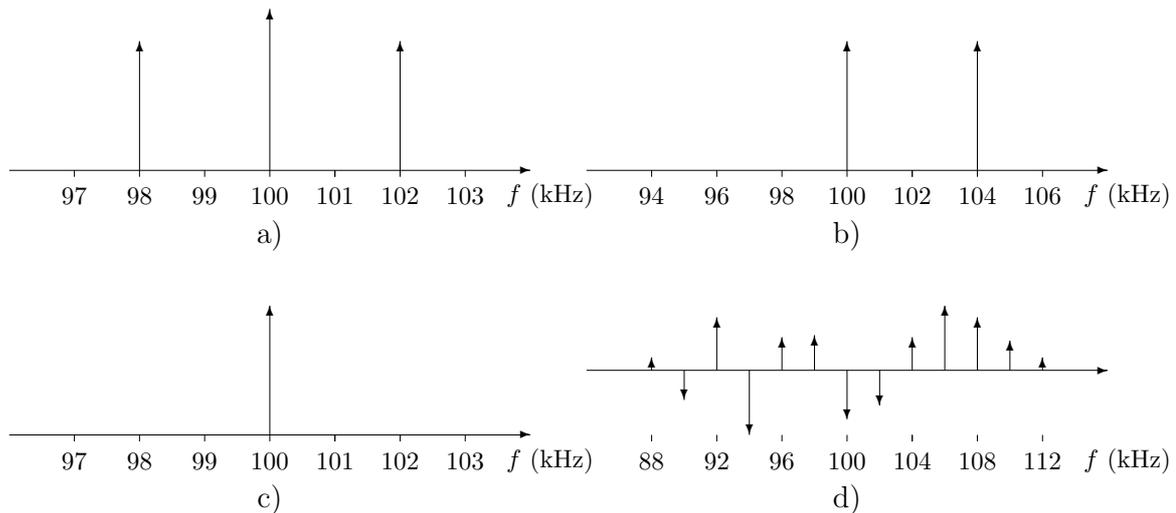


Figura 3.46: Espectros de la señal de salida de los moduladores del Ejercicio 3.1.

- Especifique a cuál o cuáles de las posibles variantes de modulaciones analógicas pertenece cada uno de los espectros, y cuál es la frecuencia de la señal portadora de cada modulador.
- Proporcione la expresión analítica completa (incluidos los posibles valores numéricos que se puedan extraer a la vista de las figuras) de la señal de entrada a los moduladores (señal moduladora  $m(t)$ ).

**Ejercicio 3.2** En un modulador FM con índice de modulación 5 y frecuencia de portadora  $f_c = 100$  MHz se introduce una señal moduladora  $m(t) = \cos(2\pi f_m t)$ , con  $f_m = 2$  MHz. Explique cómo es el espectro de la señal y dibújelo indicando claramente las frecuencias y amplitudes de las componentes más relevantes.

**Ejercicio 3.3** La señal moduladora de un sistema de comunicaciones analógico,  $m(t)$ , es una señal de ancho de banda  $B$  Hz (ó  $W = 2\pi B$  rad/s) con densidad espectral de potencia

$$S_M(j\omega) = \begin{cases} \frac{|\omega|}{W}, & \text{si } |\omega| \leq W = 2\pi B \\ 0, & \text{si } |\omega| > W = 2\pi B \end{cases}$$

La portadora tiene una frecuencia  $f_c \gg B$  Hz.

- Indique cuál es el ancho de banda de la señal modulada mediante AM convencional con índice de modulación  $a$ , y dibuje su densidad espectral de potencia,  $S_S(j\omega)$ .
- Indique cuál es el ancho de banda de la señal modulada mediante modulación de amplitud de doble banda lateral y dibuje su densidad espectral de potencia,  $S_S(j\omega)$ .

- c) Indique cuál es el ancho de banda de la señal modulada mediante modulación de amplitud de banda lateral única y dibuje su densidad espectral de potencia,  $S_S(j\omega)$ , para el caso de banda lateral inferior.
- d) Indique cuál es el ancho de banda de la señal modulada mediante una modulación FM con índice de modulación  $\beta = 5$ .

**Ejercicio 3.4** La señal moduladora de un sistema de comunicaciones analógico es  $m(t) = \cos(2\pi f_m t)$ , con  $f_m = 2$  MHz. La portadora  $c(t) = A_c \cos(\omega_c t)$ , siendo  $\omega_c = 2\pi f_c$  con una frecuencia  $f_c = 100$  MHz.

- a) Dibuje la densidad espectral de potencia e indique la potencia de la señal modulada  $s(t)$  si se emplea una modulación de amplitud con índice de modulación  $a = 0,5$ .
- b) Dibuje la densidad espectral de potencia e indique la potencia de la señal modulada  $s(t)$  si se emplea una modulación AM de doble banda lateral.
- c) Dibuje la densidad espectral de potencia de la señal modulada  $s(t)$  si se emplea una modulación AM de banda lateral única (banda lateral inferior).

**Ejercicio 3.5** En un sistema de comunicaciones analógicas la señal a transmitir (señal moduladora) es una señal en banda base de ancho de banda  $B$  Hz.

- a) Proporcione la eficiencia espectral (dando el ancho de banda) de una modulación AM convencional (con portadora), y diga cómo se comporta frente al ruido comparándola con una transmisión sin modular.
- b) Proporcione la eficiencia espectral (dando el ancho de banda) de una modulación AM de doble banda lateral sin portadora, y diga cómo se comporta frente al ruido comparándola con una transmisión sin modular.
- c) Proporcione la eficiencia espectral (dando el ancho de banda) de una modulación AM de banda lateral única, y diga cómo se comporta frente al ruido comparándola con una transmisión sin modular.
- d) Proporcione la eficiencia espectral (dando el ancho de banda) de una modulación AM de banda lateral vestigial, y diga cómo se comporta frente al ruido comparándola con una transmisión sin modular.
- e) Proporcione la eficiencia espectral (dando el ancho de banda) de una modulación FM con índice de modulación  $\beta = 3$ , y diga cómo se comporta frente al ruido comparándola con una transmisión sin modular.

**Ejercicio 3.6** Las siguientes ecuaciones presentan las expresiones analíticas de la señal modulada  $s(t)$  para una señal moduladora  $m(t)$  en distintas modulaciones analógicas.

- a)  $s_1(t) = A_c \cdot m(t) \cdot \cos(\omega_c t + \phi_c)$
- b)  $s_2(t) = A_c \cdot \cos(\omega_c t + a \cdot m(t))$
- c)  $s_3(t) = A_c \cdot [1 + m(t)] \cdot \cos(\omega_c t + \phi_c)$
- d)  $s_4(t) = A_c \cdot m(t) \cdot \cos(\omega_c t + \phi_c) - A_c \cdot \hat{m}(t) \cdot \sin(\omega_c t + \phi_c)$

$$e) s_5(t) = A_c \cdot \cos(\omega_c t + b \cdot \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau)$$

$$f) s_6(t) = A_c \cdot m(t) \cdot \cos(\omega_c t + \phi_c) + A_c \cdot \hat{m}(t) \cdot \sin(\omega_c t + \phi_c)$$

donde  $\hat{m}(t)$  denota la transformada de Hilbert de la señal moduladora.

**Ejercicio 3.7** Diga a qué variante de modulación analógica corresponde cada una de las siguientes expresiones analíticas de la densidad espectral de potencia,  $S_S(j\omega)$ , o transformada de Fourier,  $S(j\omega)$ , de la señal modulada  $s(t)$ .

$$a) S_S(j\omega) = \begin{cases} 0, & |\omega| > \omega_c \\ A_c^2 \cdot [S_M(j\omega - j\omega_c) + S_M(j\omega + j\omega_c)], & |\omega| \leq \omega_c \end{cases}$$

$$b) S_S(j\omega) = \frac{A_c^2}{4} \cdot [S_M(j\omega - j\omega_c) + S_M(j\omega + j\omega_c)]$$

$$c) S(j\omega) = A_c \cdot \pi \cdot [\delta(\omega - \omega_c) \cdot e^{j\phi_c} + \delta(\omega + \omega_c) \cdot e^{-j\phi_c}] + \frac{A_c}{2} \cdot [M_a(j\omega - j\omega_c) \cdot e^{j\phi_c} + M_a(j\omega + j\omega_c) \cdot e^{-j\phi_c}]$$

$$d) S_S(j\omega) = \begin{cases} A_c^2 \cdot [S_M(j\omega - j\omega_c) + S_M(j\omega + j\omega_c)], & |\omega| \geq \omega_c \\ 0, & |\omega| < \omega_c \end{cases}$$

$$e) S(j\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_c \cdot \pi \cdot J_n(3) \cdot [\delta(\omega - \omega_c - n \cdot \omega_m) + \delta(\omega + \omega_c + n \cdot \omega_m)]$$

$$f) S_S(j\omega) = \frac{A_c^2}{2} \cdot \pi \cdot [\delta(\omega - \omega_c) + \delta(\omega + \omega_c)] + \frac{A_c^2}{4} \cdot [S_{M_a}(j\omega - j\omega_c) + S_{M_a}(j\omega + j\omega_c)]$$

**Ejercicio 3.8** Para modulaciones de amplitud (AM), y en particular para sus receptores

- Explique qué es un receptor coherente y dibuje un diagrama de bloques que explique los distintos módulos que lo forman.
- Diga cuáles son las variantes de AM que requieren la utilización de un receptor coherente y cuáles pueden utilizar un receptor más simple sin pérdida de prestaciones (en este caso diga qué receptor simple se puede utilizar).
- Indique, de forma específica para cada una de las variantes AM que requieren de su utilización, cuál es el efecto de no utilizar un receptor coherente.

**Ejercicio 3.9** La señal moduladora de un sistema de comunicaciones se modela mediante un proceso aleatorio estacionario de media nula y cuya densidad espectral de potencia es la que se muestra en la Figura 3.47.

El sistema de comunicaciones utiliza una modulación de banda lateral única (BLU) con banda lateral inferior y frecuencia de portadora  $\omega_c \gg W$  rad/s.

- Represente la densidad espectral de potencia de la señal modulada.
- Compare, en términos de eficiencia espectral, la modulación BLU con las modulaciones AM convencional, AM de doble banda lateral, y modulación FM con índice de modulación  $\beta > 1$ .

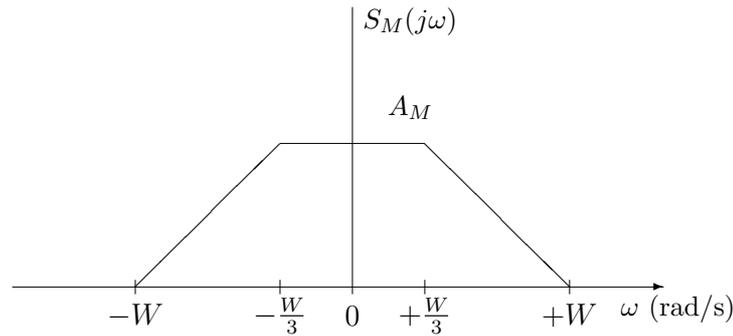


Figura 3.47: Densidad espectral de potencia de la señal moduladora para el Ejercicio 3.9.

**Ejercicio 3.10** En un sistema de transmisión analógica, cuya frecuencia de portadora es de 50 kHz y amplitud  $A_c = 1$ , se va a transmitir como señal moduladora un tono de 5 kHz, es decir

$$m(t) = \cos(2\pi f_m t), \text{ con } f_m = 5 \times 10^3 \text{ Hz.}$$

- Si se utiliza modulación AM convencional, calcule el ancho de banda de la señal modulada, y dibuje, de forma aproximada, la señal modulada en el dominio del tiempo si el índice de modulación es  $a = \frac{1}{2}$  (etiquete adecuadamente ambos ejes, especialmente el de amplitud de la señal modulada).
- Si se considera una modulación de amplitud, pero se desea eliminar la ineficiencia que supone la transmisión de la portadora, ¿qué modulaciones serían posibles? Indique el ancho de banda de la señal modulada en todos los casos posibles.
- En el caso de utilizar una modulación FM con índice de modulación  $\beta_f = 7$ , indique cuál es el ancho de banda teórico (de forma exacta), defina lo que es el ancho de banda efectivo de la señal modulada, y diga cuál sería su valor para este caso.
- Cuando se comparan las modulaciones angulares frente a las modulaciones lineales o de amplitud, explique la ventaja fundamental y la principal desventaja de las primeras respecto a las segundas.

**Ejercicio 3.11** Considere las señales de la Figura 3.48.

- Las figuras A, B, C y D muestran la señal modulada cuando se transmite la señal moduladora  $m(t)$  utilizando cuatro tipos de modulaciones analógicas: AM convencional (en este caso con índice de modulación  $a = \frac{1}{2}$ ), modulación de doble banda lateral (DBL), modulación de fase (PM) y modulación de frecuencia (FM). Identifique a qué tipo de modulación corresponde cada una de las figuras, indicando los rasgos distintivos de la misma (sin esta indicación, la respuesta no será considerada como válida).

NOTA: para facilitar la identificación, se ha superpuesto en las 4 figuras en trazo fino la portadora  $c(t)$ .

- Diga qué tipo de modulación analógica, de entre todas las posibles (no se limite a las 4 indicadas en el apartado anterior), utilizaría en los casos que se van a describir a continuación. Para cada caso, debe indicar de forma precisa qué característica de dicha modulación es la que la hace apropiada, y qué ventaja proporciona respecto al resto de modulaciones (sin esta indicación, la respuesta no será considerada como válida).

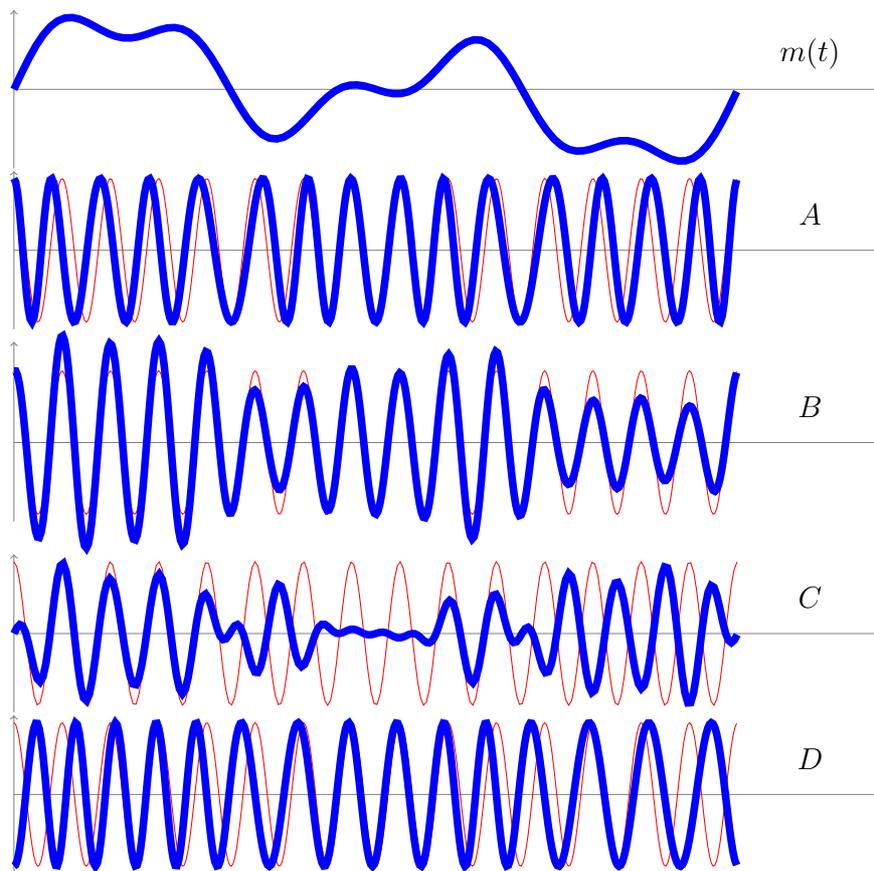


Figura 3.48: Señales para el Ejercicio 3.11.

- I) Sistema que transmite señales de alta fidelidad, donde lo más importante es la calidad de la señal recibida.
- II) Sistema en que la principal prioridad es que los receptores sean lo más económicos que sea posible.
- III) Un sistema de multiplexación de señales de voz por un mismo cable, con un ancho de banda de 400 MHz, en el que se desea poder multiplexar el mayor número posible de señales de voz.

**Ejercicio 3.12** Para una modulación de amplitud de banda lateral vestigial, con una señal moduladora de ancho de banda  $W$  rad/s

- a) Explique cómo se genera la señal modulada, y dibuje un diagrama de bloques con los distintos elementos que forman el transmisor.
- b) Indique qué condición tiene que cumplir el filtro de banda lateral vestigial para este tipo de modulación, y para cada uno de los filtros de la Figura 3.49, demuestre si se cumple o no dicha condición, y en caso de que así sea, diga si se utilizaría para una modulación de banda lateral superior o inferior.

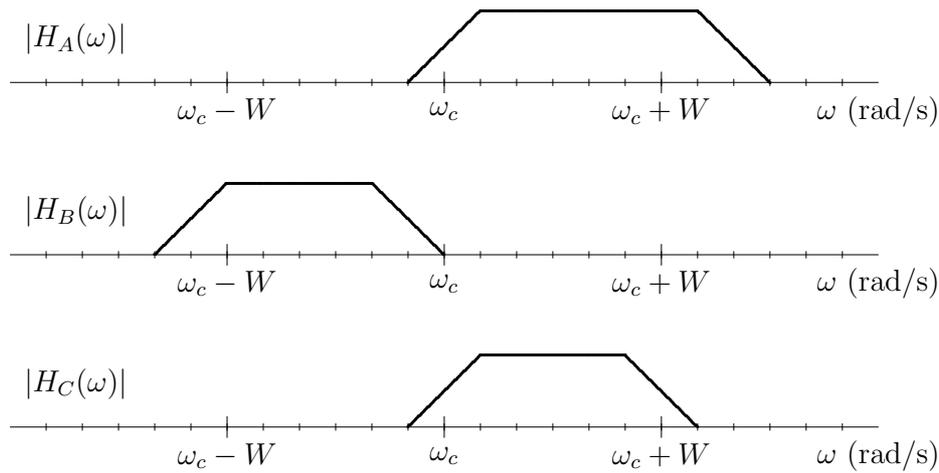


Figura 3.49: Respuestas en frecuencia de los filtros para el Ejercicio 3.12.