

TEMA 5: MODULACIÓN Y DEMODULACIÓN LINEAL

Comunicaciones Inalámbricas

Marina Zapater

Primavera 2015

Departamento de Física Aplicada III, Universidad Complutense de Madrid



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

CONTENIDO DEL TEMA:

Introducción

Modulaciones analógicas

Modulaciones digitales

Detección de señales analógicas

Detección de señales digitales

Recuperación de reloj

Ejercicios

INTRODUCCIÓN

- Decimos que un proceso \mathcal{L} es lineal cuando cumple:

$$\text{Si } \left. \begin{array}{l} y_1 = \mathcal{L}(x_1) \\ y_2 = \mathcal{L}(x_2) \end{array} \right\} \Rightarrow k_1 y_1 + k_2 y_2 = \mathcal{L}(k_1 x_1 + k_2 x_2)$$

Donde k_1 y k_2 son constantes reales.

$$V(t) = Ax(t)\cos(\omega_0 t) + By(t)\sin(\omega_0 t)$$

Características:

- Condición de linealidad
- $|x(t)| \leq 1$ (acotada) y de media cero ($\langle x(t) \rangle = 0$)
- Procesos de multiplicación con una portadora
- La potencia de salida es proporcional a la potencia de entrada.
- La banda final no supera el doble de la frecuencia más alta de banda base.

Veremos la siguientes modulaciones:

■ Analógicas:

- Modulación de amplitud (AM)
- Modulación en Doble Banda Lateral (DBL)
- Modulación en Banda Lateral Única (BLU)
- Modulación I&Q

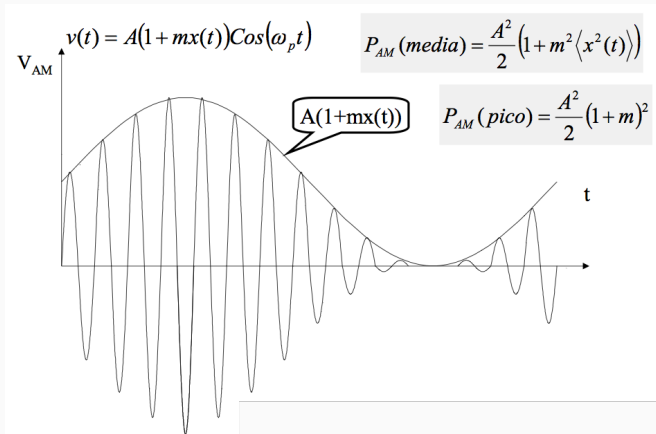
■ Digitales:

- Modulación ASK
- Modulación QAM

En la primera parte del tema veremos la modulación y luego la demodulación.

MODULACIONES ANALÓGICAS

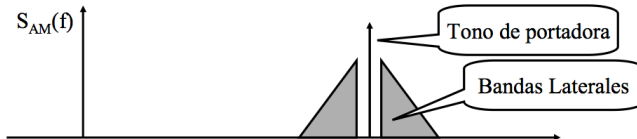
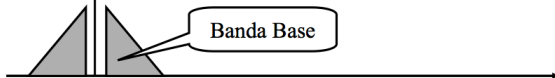
MODULACIÓN AM



MODULACIÓN AM: DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL DE POTENCIA

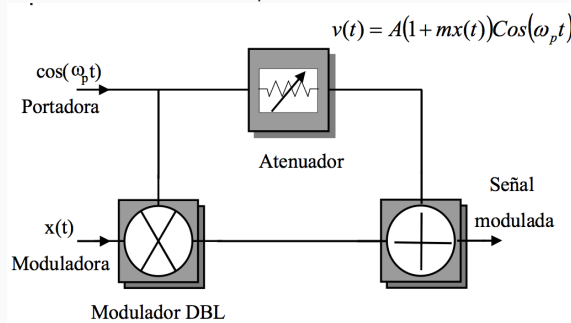
$$v(t) = A(1 + mx(t))\cos(\omega_p t) \quad |x(t)| \leq 1$$

$$S_{AM}(f) = \frac{A^2}{4} (\delta(f - f_p) + \delta(f + f_p)) + \frac{m^2 A^2}{4} (S_x(f - f_p) + S_x(f + f_p))$$



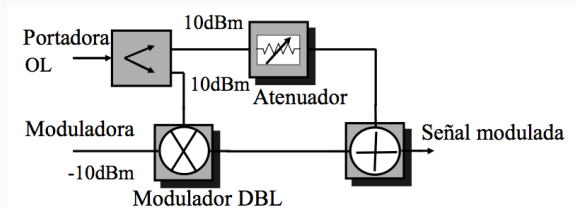
MODULACIÓN AM: MODULADOR POR MEZCLA

Modulamos en AM a partir de un conversor de frecuencia:



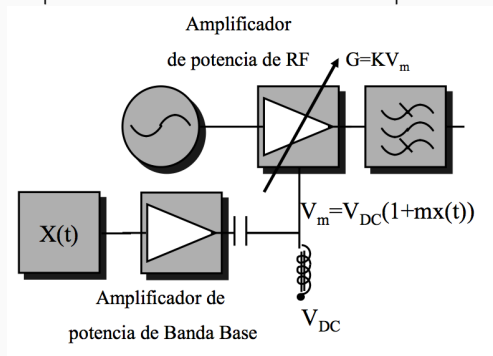
MODULACIÓN AM: EJEMPLO

Considere un modulador con un mezclador en configuración doblemente balanceada con rechazo del oscilador. Si las pérdidas en el proceso de mezcla son de 6dB, determine los valores de atenuación o ganancia en la rama de oscilador, para conseguir una profundidad de modulación del 100%. Considere los niveles de impedancia de 50Ω en todas las puertas y una relación de potencia media a potencia de pico de la señal moduladora de $\langle x^2(t) \rangle$ de 0.1



- Un inconveniente de las señales moduladas AM en niveles bajos es la necesidad de una amplificación lineal para evitar la distorsión de la señal
- En amplificadores de potencia de un transmisor, linealidad va asociada a bajo rendimiento de potencia (en torno a 50% con m bajo, y 12% para $m = 1$)
- Para mejorar rendimiento, en transmisores de alta potencia:
 - Se amplifican portadora y moduladora por separado en etapas anteriores
 - Se hace la modulación en la última etapa amplificadora.
- El modulador se comporta como un amplificador de ganancia variable
- El filtro de salida elimina armónicos generados en el amplificador

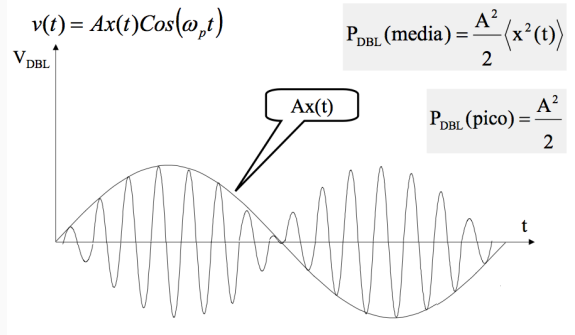
Esquema del modulador con amplificador de ganancia variable:



Si $x(t)$ es la señal moduladora, P_0 es la potencia de la portadora, y η es el rendimiento del modulador, tendremos:

- Potencia de las bandas laterales: $P_0 m^2 \frac{\langle x^2(t) \rangle}{2}$
- Potencia de salida: $P_0 (1 + m^2 \langle x^2(t) \rangle)$
- Potencia de continua: $\frac{P_0}{\eta}$
- Potencia de modulación: $\frac{P_0}{\eta} m^2 \langle x^2(t) \rangle$

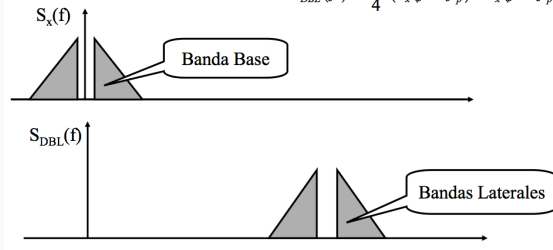
Forma de onda en Doble Banda Lateral sin portadora:



Espectro de la señal DBL sin portadora:

$$v(t) = Ax(t)\cos(\omega_p t) \quad |x(t)| \leq 1$$

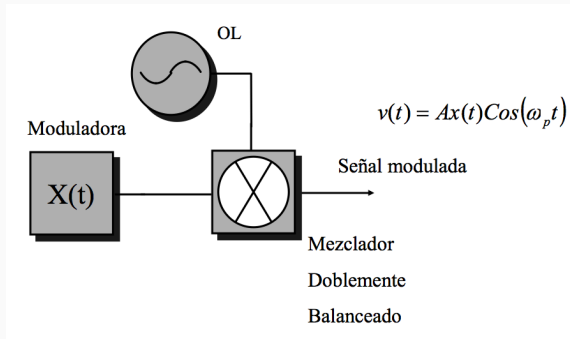
$$S_{DBL}(f) = \frac{A^2}{4}(S_x(f - f_p) + S_x(f + f_p))$$



- Potencia media: $P_{DBL} = \frac{A^2}{2} \langle x^2(t) \rangle$
- Potencia de pico: $P_{DBLpico} = \frac{A^2}{2}$

MODULACIÓN DBL SIN PORTADORA

- Se puede generar en un conversor de frecuencia equilibrado con **buen aislamiento** entre OL y la salida, eliminando la portadora.
- Cualquier esquema de mezclador equilibrado es válido.



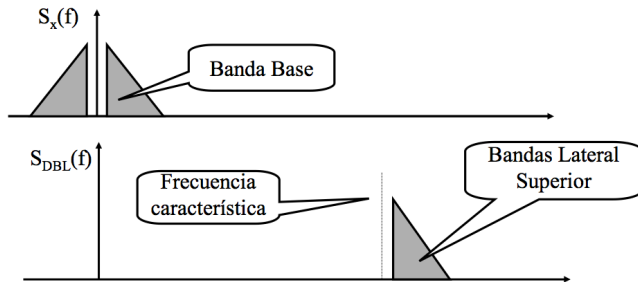
Modulación Banda Lateral Única:

- Eliminamos una de las bandas laterales del espectro DBL
- El ancho de banda de la señal BLU es la misma que el de la señal en banda base
- En general no tenemos una portadora, sino una frecuencia característica
- Formas de obtener una BLU:
 - eliminando una banda lateral por **desfasaje** entre dos señales DBL con moduladoras y portadoras en cuadratura
 - eliminando la banda no deseada por **filtrado** de la señal modulada

Espectro de la señal Banda Lateral Única:

$$v_{BLUS}(t) = x(t)\cos(\omega_0 t) - y(t)\text{sen}(\omega_0 t)$$

$$v_{BLUI}(t) = x(t)\cos(\omega_0 t) + y(t)\text{sen}(\omega_0 t)$$

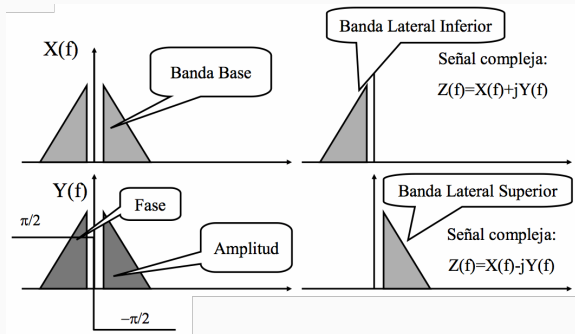


MODULACIÓN BLU: TRANSFORMADA DE HILBERT

- La señal BLU se puede describir como:

$$v_{BLU}(t) = Ax(t)\cos(\omega_p t) \pm By(t)\sin(\omega_p t)$$

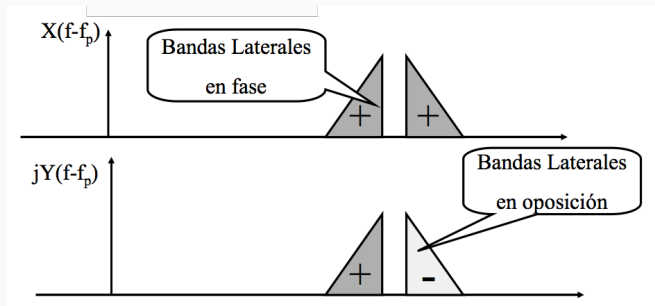
- donde $Y(f) = X(f)e^{j\pi/2}$
- es decir, $y(t)$ se obtiene introduciendo un cambio de fase de $\pi/2$ en todas las componentes espectrales de la señal de modulación



MODULACIÓN BLU: TRANSFORMADA DE HILBERT

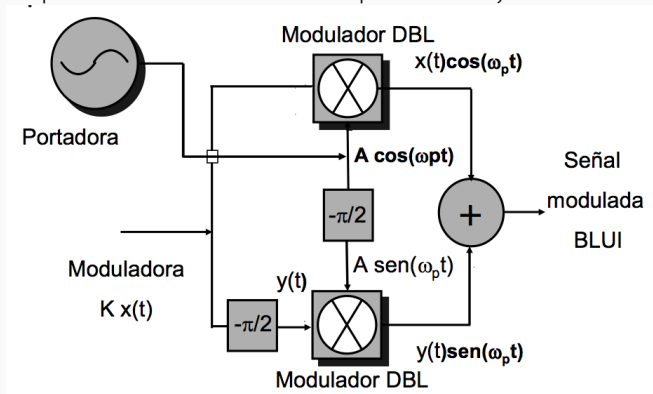
Esquema de la composición espectral de las dos señales obtenidas en la modulación DBL con portadoras en cuadratura.

- se indica la fase relativa con respecto a la que poseen las señales en banda base.



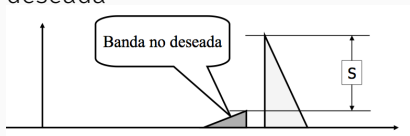
MODULACIÓN BLU POR DESFAJAJE

Esquema del modulador BLU por desfase



MODULACIÓN BLU POR DESFAJAJE

- Poco usada porque se requiere un desfaseador de 90° de banda ancha para la transformada de Hilbert \rightarrow difícil de obtener a amplitud constante con la frecuencia
- Esto rompe el equilibrio necesario para cancelar la banda no deseada



- La relación de potencias entre la banda lateral deseada y la rechazada es:

$$S(\text{dB}) = 10 \log \left[\frac{1 + R^2 + 2R \cos(\Delta - \theta)}{1 + R^2 - 2R \cos(\Delta + \theta)} \right]$$

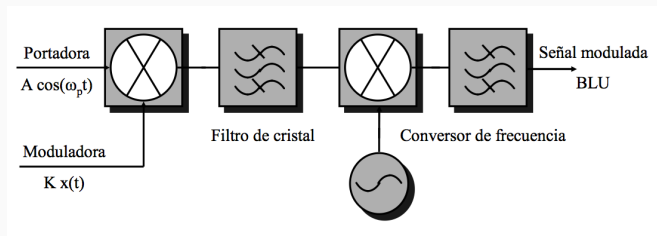
R= Error de amplitud

Δ = error de fase del oscilador

θ = error de fase del desfaseador

Esquema del modulador BLU por filtrado:

- Eliminamos la banda no deseada con un filtro paso banda
- El filtro paso banda requiere una caída de atenuación muy rápida, para dejar pasar la banda deseada y cancelar la no deseada.

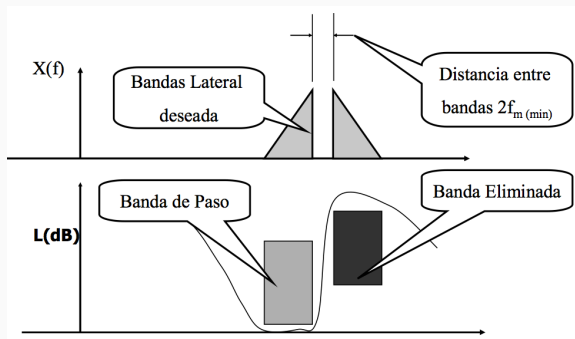


MODULACIÓN BLU POR FILTRADO

- Necesitamos una pendiente de:

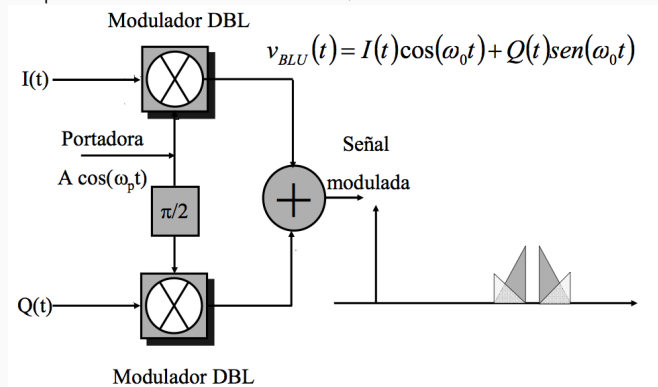
$$\text{Pendiente} = \frac{L(\text{dB})}{\log_2 \frac{f_2}{f_1}}$$

- Utilizaremos filtros basados en cristal de cuarzo,



- Consiste en dos mezcladores doblemente balanceados alimentados por portadoras desfasadas 90° .
- Debe tenerse precaución para que las señales no saturen los mezcladores.
- Especificaciones más importantes:
 - Punto de compresión a 1dB
 - Rechazo a banda eliminada
 - Nivel de supresión de la portadora
 - Pérdidas de conversión

Esquema del modulador I&Q:



MODULACIONES DIGITALES

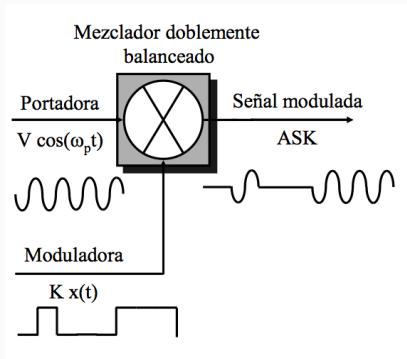
- En este caso, la señal modulada es digital. Y en general, binaria:
 $p(t) = 0, 1$
- ... mientras que antes $x(t)$ podía tomar cualquier valor entre -1 y 1.
- Veremos las modulaciones:
 - Modulación ASK
 - Modulación QAM

- Modulamos siguiendo una secuencia binaria:

$$v_{ASK}(t) = Vp(t)\cos(\omega_p t)$$

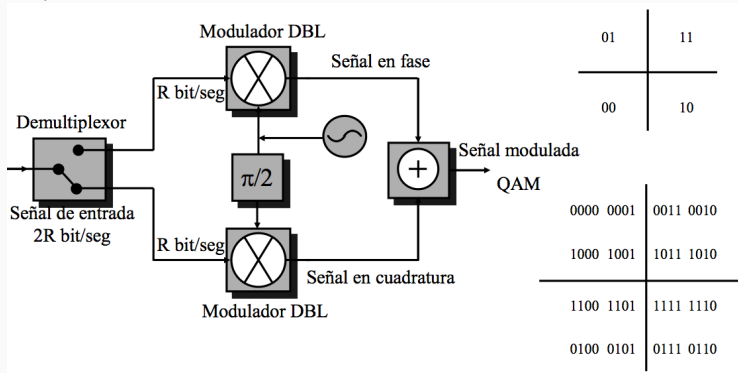
- La modulación tiene muy poca inmunidad frente a ruido.
- Hay dos formas de llevar a cabo la modulación:
 - Usando un conmutador controlado por señal moduladora
 - Usando un modulador DBL

Esquema del modulador ASK:



- Combinación en cuadratura de dos modulaciones DBL con señales $p(t)$ de igual bit rate.
 - se logra un bit rate doble del asociado a cada una de las modulaciones por separado
 - el ancho de banda QAM es idéntico al de cada una de las DBL
- La modulación QAM combina modulación en amplitud y en fase: usa codificaciones multinivel, donde:
 - tenemos M símbolos
 - necesitamos expresarlos usando n bits, de la forma $M = 2^n$
- La parte crítica es la conformación de los pulsos. Hay que limitar la banda de transmisión y asegurar una óptima probabilidad de detección

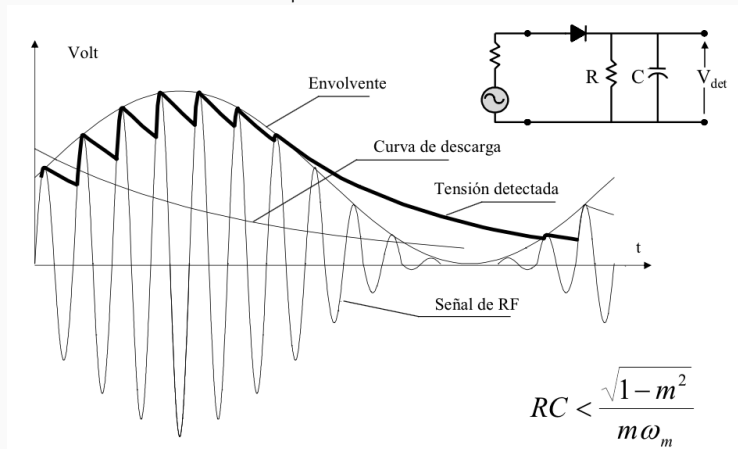
Esquema del modulador QAM:



DETECCIÓN DE SEÑALES ANALÓGICAS

- La detección de cualquier señal, implica la extracción de la información original.
- En AM, tenemos dos tipos de detección:
 - **Detección de envolvente:** la envolvente de la señal AM es una réplica de la moduladora
 - **Detección coherente:** mediante recuperación de la portadora

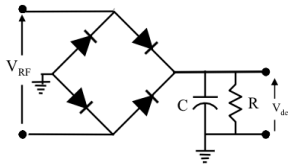
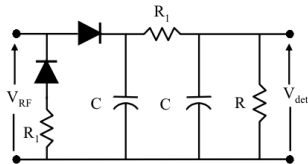
La envolvente es una réplica de la señal moduladora:



- Utiliza un circuito detector de envolvente con un diodo
- Para valores elevados de señal ($> -10dBm$ en un Schottky):
$$v_{det}(t) = |v_{ent}| - V_d$$
- Cuanto menor sea V_d (tensión umbral del diodo), mejor será el comportamiento del detector de envolvente.
- Tenemos una carga muy rápida y una descarga lenta regida por $\tau = RC$
- La tensión a la salida tiene una componente continua y un determinado rizado
- Existe un compromiso en la elección de τ :
 - menor que la velocidad de variación de la señal moduladora
 - elevado para eliminar componentes de alta frecuencia

Solemos añadir más componentes al detector de envoltente:

- equilibramos la corriente que se suministra sin cargar el amplificador RF de la etapa anterior
- mejorar el filtrado de la componente RF a la salida → con un puente de diodos, la componente RF a la salida tiene frecuencia doble



Considere un detector de envolvente cuya señal de entrada comprende una portadora de 455kHz modulada en AM por una señal de audio que cubre la banda de 30Hz a 5kHz. La profundidad de modulación es del 95%.

Determine la constante RC del filtro para conseguir una demodulación sin distorsión. Cuál es el rizado máximo obtenido para una señal de portadora sin modular en el detector de un solo diodo? Y en un detector con un puente de diodos?

- Las señales AM tienen una pérdida importante de la relación señal ruido porque la potencia de la portadora no contribuye a la señal.
- Además, si tenemos un ruido additivo $n(t)$:

$$v(t) = v_{AM}(t) + n(t)$$

que puede descomponerse por sus componentes en fase y cuadratura:

$$n(t) = n_1(t)\cos(\omega_p t) + n_2(t)\sen(\omega_p t)$$

- La señal a la entrada del detector será:

$$v(t) = [A(1 + mx(t)) + n_1(t)]\cos(\omega_p t) + n_2(t)\cos(\omega_p t)$$

$$(S/N)_{ent} = \frac{2P_0(1+m^2\langle x^2(t)\rangle)}{\langle n_1^2(t)\rangle + \langle n_2^2(t)\rangle}$$

- Y a la salida del detector:

$$v_{det}(t) = \sqrt{[A(1 + mx(t) + n_1(t))]^2 + n_2^2(t)}$$

- Y si consideramos que $A \gg n_1, A \gg n_2$:

$$(S/N)_{det} = \frac{2P_0 m^2 \langle x^2(t) \rangle}{\langle n_1^2(t) \rangle} = (S/N)_{ent} 2 \frac{m^2 \langle x^2(t) \rangle}{1 + m^2 \langle x^2(t) \rangle}$$

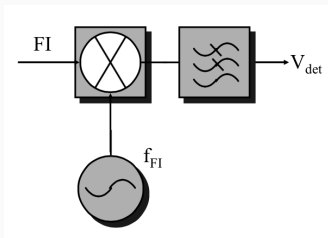
- Es decir, la S/N mejora con la profundidad de modulación porque la portadora tiene menor potencia comparada con las bandas laterales
- El valor $\langle x^2(t) \rangle$ es muy importante. En señales de audio, $\langle x(t) \rangle$ es baja y supone mucha pérdida de calidad en el sistema.

Esquema genérico de un detector coherente:

- Consiste en multiplicar la señal modulada por un tono de la misma frecuencia y fase que la portadora y extraer la señal en banda base resultante.
- Por tanto:

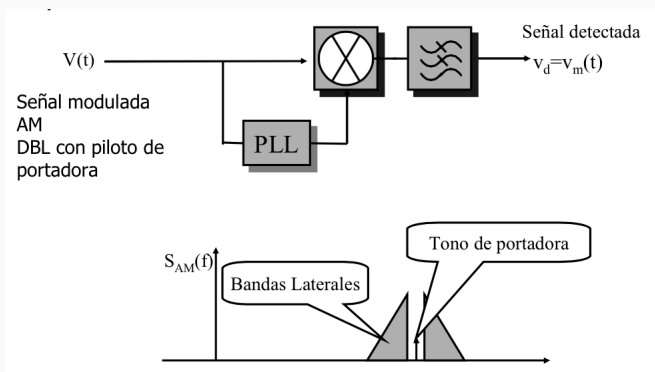
$$V_{det} = K V_{AM} V_{FI}(t)$$

$$V_{det} = KA \frac{1}{2} (1 + mx(t))(1 + \cos(2\omega_p t))$$



DETECTOR COHERENTE PARA DEMODULACIÓN AM

- Problema: necesitamos sintetizar la misma frecuencia y fase que la portadora → requiere el uso de un PLL

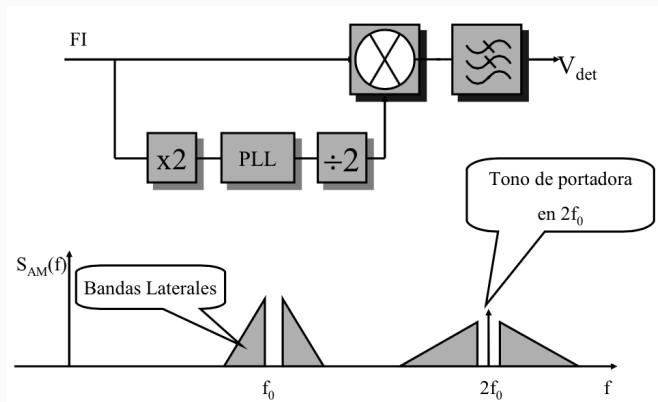


- Respecto al ruido: el detector no responde a la componente en cuadratura del ruido. Tendremos la misma relación señal ruido que en el caso de la detección AM por envolvente para amplitudes grandes.

- En DBL la detección de envolvente no sirve como sistema de demodulación (la envolvente no equivale a la moduladora)
- Sólo podemos usar detección coherente
- Como no hay portadora, no podemos emplear un PLL como recuperador de portadora → usamos un doblador

Señal DBL: $v_{DBL}(t) = Ax(t)\cos(\omega_p t)$

Señal doblada: $[v_{DBL}(t)]^2 = A^2x^2(t)\cos^2(\omega_p t) = \frac{A^2}{2}x^2(t)[1 + \cos(2\omega_p t)]$



- El nivel de distorsión en la detección se asocia a un error de frecuencia (Δf) o de fase ($\Delta\phi$) respecto de la portadora original:

$$v_{det} = kA\frac{1}{2}\cos(\Delta\omega t + \Delta\phi)$$

- Si $\Delta\phi \neq 0$ y $\Delta f = 0 \rightarrow$ pérdida de amplitud.
- Si $\Delta\phi \neq 0$ y $\Delta f \neq 0 \rightarrow$ modulación parásita de amplitud
- Respecto a la relación señal a ruido, en DBL no hay portadora, así que la señal a la salida es la suma de las dos bandas laterales:

$$(S/N)_{det} = 2(S/N)_{ent}$$

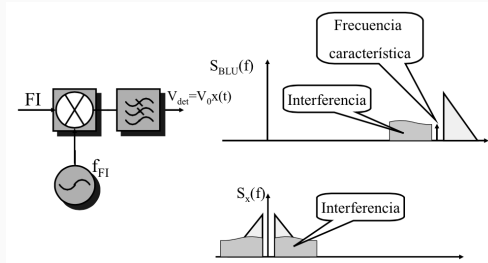
- En la detección BLU sólo existe la posibilidad de detección coherente.
- La única forma de recuperar la portadora es tener un piloto junto a la banda transmitida.
- El PLL se enganchará al piloto de la BLU
- El nivel de distorsión asociado a un error de frecuencia (Δf) o de fase ($\Delta\phi$) respecto de la portadora:

$$v_{det} = kA\frac{1}{2}[x(t)\cos(\Delta\omega t + \Delta\phi) \pm y(t)\sin(\Delta\omega t + \Delta\phi)]$$

- Error de fase: ruido añadido
- Error de frecuencia: la transformada de Hilbert varía \rightarrow pequeñas variaciones pueden ocasionar fuertes pérdidas de señal
- Respecto al ruido, no hay mejora de la relación señal ruido

- Tenemos problema de aparición de señales en la banda imagen.
- A la entrada del detector podemos tener:

$$v(t) = [x_s(t)\cos(\omega_p t) + y_s(t)\sen(\omega_p t)] + [x_Y(t)\cos(\omega_p t) - y_Y(t)\sen(\omega_p t)]$$



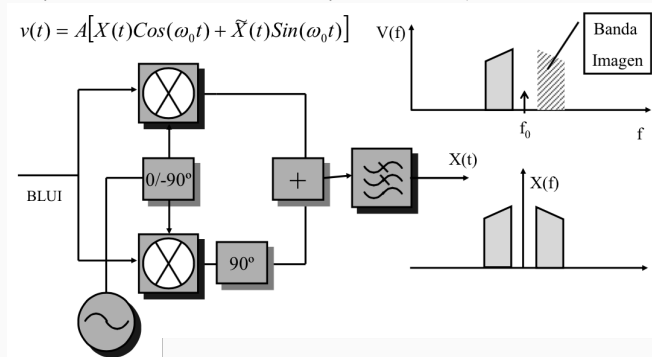
- Hay que eliminar la banda imagen antes de la detección:
 - Por filtrado o usando un mezclador con rechazo de banda imagen

DETECTOR BLU POR DESFASAJE

El detector BLU puede llevarse a cabo partiendo del detector DBL:

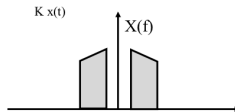
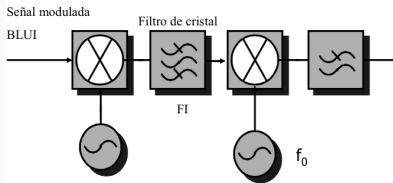
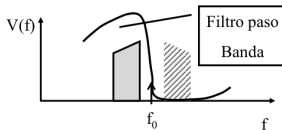
- por desfaseaje
- por filtrado

Esquema del detector BLU por desfaseaje:



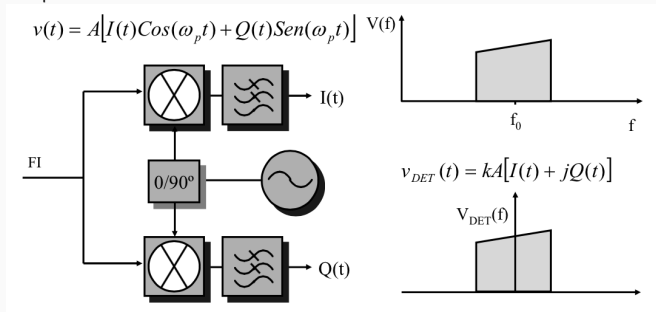
Esquema del detector BLU por filtrado:

$$v(t) = A[X(t)\cos(\omega_0 t) + \tilde{X}(t)\sin(\omega_0 t)]$$



- El detector DBL está formado por dos detectores coherentes DBL que operan en modo lineal, alimentados por portadoras desfasadas 90° .
- Problema más importante: detección de portadora \rightarrow no existe tono puro asociado a la señal de entrada
 - Si las señales I y Q no tienen componente continua y son de la misma potencia hay que trabajar con el cuarto armónico (en vez de doblador, elevamos a la cuarta potencia)
- En general se utiliza un bucle de costas (Costas Loop) para recuperar la portadora.

Esquema del detector I&Q:



DETECCIÓN DE SEÑALES DIGITALES

- Al igual que en AM, la detección ASK se puede llevar a cabo:
 - Con un detector de envolvente
 - Con un detector coherente

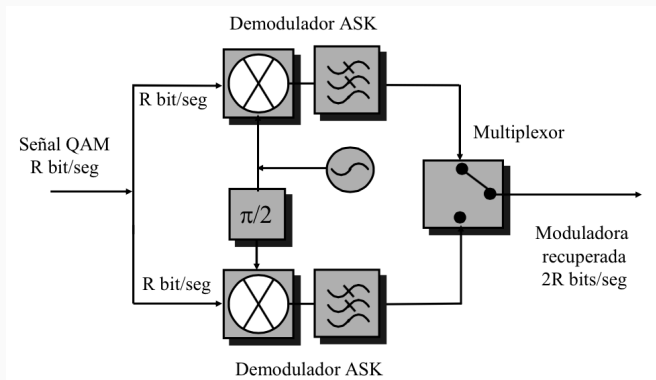
Detección ASK con detector de envolvente

- El mismo circuito que en AM, pero llevamos la envolvente a un circuito de decisión que regenera la señal moduladora digital.
- Pérdida de relación señal a ruido porque la portadora no contribuye a la señal detectada.
 - $\langle x^2(t) \rangle = 1/2 \quad \rightarrow \quad (S/N)_{det} = \frac{m^2}{1+m^2/2}$
 - Para $m = 1$ la relación señal ruido se degrada 0.66

Detector ASK coherente:

- El diagrama de bloques es idéntico que para la detección coherente de AM. La señal analógica se lleva a un circuito de decisión para regenerar la señal digital.
- Respecto a la relación señal a ruido, las expresiones son idénticas que para AM con detector coherente:
 - Modulación unipolar (ASK): $\langle x^2(t) \rangle = 0.5$
 - Modulación bipolar (BPSK): $\langle x^2(t) \rangle = 1$

- Esta detección se lleva a cabo igual que una demodulación I&Q, con señales digitales.
- Añadimos un detector de niveles MASK y un demultiplexor

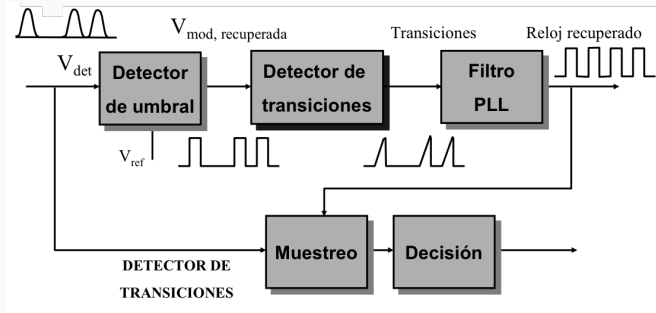


RECUPERACIÓN DE RELOJ

- Uno de los puntos más importantes en la detección de señales digitales es la recuperación de reloj
- Permite obtener, a partir de la secuencia digital reconstruida a la salida, obtener el sincronismo de bits
- El método de recuperación de reloj más típico consiste en el uso de un detector de transiciones (flancos) y un generador de pulsos cortos.

Nota: No debe confundirse la recuperación de la portadora con la recuperación del reloj!

Esquema del sistema típico de recuperación de reloj:



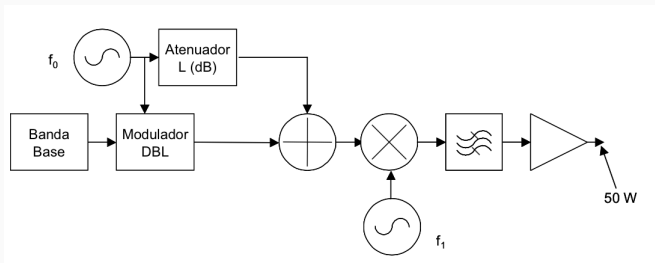
Problemas del método:

- La tensión de referencia V_{ref} afecta a la posición del pulso de sincronismo.
- Si hay ausencia de transiciones (transmisión de ráfaga de 1's o 0's), el PLL puede desengancharse.
 - Hay que calcular el ancho de banda del lazo para que pueda seguir cierto número de transiciones sin desengancharse.

EJERCICIOS

EJERCICIO 1

En la figura se muestra el esquema de bloques de un transmisor de AM con modulación a bajo nivel, en el que se distinguen el modulador, una conversión a la frecuencia de transmisión y un amplificador de potencia. La frecuencia de salida debe ser sintonizable entre 600 y 1200 KHz. La potencia media a la salida debe ser de 50W. La señal de banda base normalizada ($x(t)$) posee valor medio nulo y una potencia media $\langle x^2(t) \rangle = 0.2$. El modulador DBL puede considerarse como un mezclador con pérdidas de 10dB en la conversión de banda base a cada una de las bandas laterales.

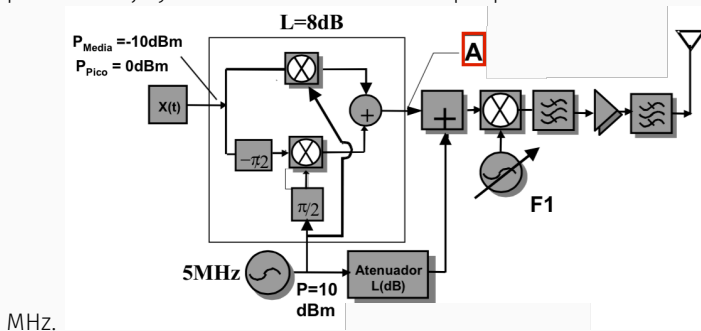


EJERCICIO 1

1. Determine la atenuación del atenuador para conseguir un nivel de modulación del 100% si la potencia media de señal a la entrada del modulador es de -15dBm y la potencia a la salida del oscilador es de 10 mW . ¿Cuál es la potencia a la salida del sumador?
2. Determine un valor adecuado del margen de frecuencia del oscilador (f_1) si la modulación se realiza en 455 KHz . ¿Cuál es la misión del filtro paso banda de salida?
3. Obtenga la ganancia total en el proceso de amplificación si el mezclador tiene unas pérdidas de 6dB y el filtro de 3dB .

EJERCICIO 2

El esquema de la figura representa un transmisor en BLU con modulación por desfasaje y una frecuencia de salida que puede variarse entre 28 y 30



EJERCICIO 2

1. Determine el máximo error de fase del desfasador de señal para conseguir un rechazo de la banda lateral no deseada de 40dB. Considere que el desfasador del oscilador no tiene error.
2. Calcule la potencia media y de pico en el punto A considerando que el modulador atenua 8 dB la señal de modulación.
3. ¿Cuál debe ser la atenuación del atenuador L para que el piloto de portadora suponga sólo un 10% de la potencia total?

PREGUNTAS?