

# EL4005 Principios de Comunicaciones

## Clase No.7: Detección de Portadora - Receptores AM Más Complejos



Patricio Parada

Departamento de Ingeniería Eléctrica  
Universidad de Chile

1 de Septiembre de 2010

# Contenidos de la Clase (1)

---

## Adquisición de Portadora

- Problemas de Jitter y Desfase

- Circuito Enclavado en Fase

- Casos Prácticos de Adquisición de Portadora

## Receptor AM Superheterodino

## Resumen y Lecturas

## Motivación (1)

---

- En los esquemas de modulación de amplitud vistos, el receptor debe “recrear” las condiciones en que la portadora fue generada:
  - frecuencia,
  - fase.
- En algunos casos se puede enviar la portadora mediante un tono, como en AM convencional, pero ello puede reducir la eficiencia de la modulación.

## Motivación (2)

---

- Otra forma para lograr demodulación síncrona (coherente) es mediante circuitos especiales en el receptor (tema de esta clase).

## Adquisición de la Portadora (1)

---

- Hemos vistos que discrepancias en la fase y/o la frecuencia entre la señal portadora generada en el Tx y el Rx pueden anular o contaminar la señal recibida.
- En el caso ideal no hay desplazamientos de frecuencia ni de ángulo.
- Consideremos el envío de un tono

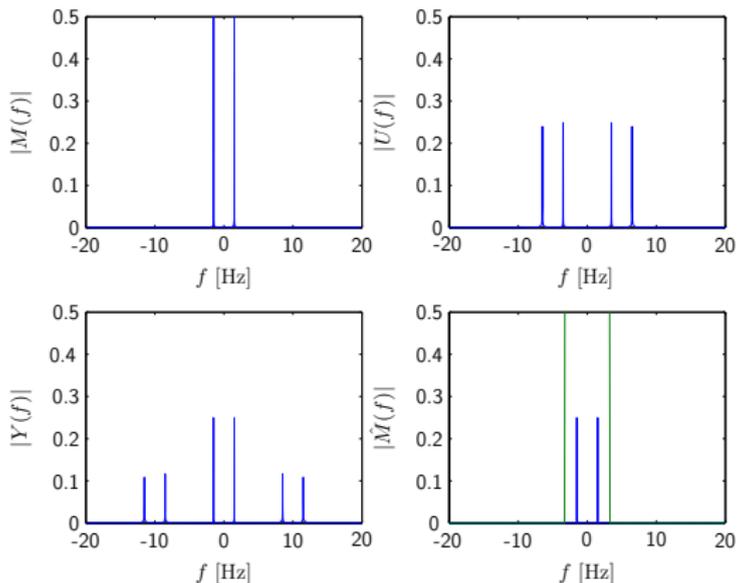
$$m(t) = \cos(2\pi f_m t) \quad (1)$$

con  $f_m = 0,5$  Hz.

## Adquisición de la Portadora (2)

---

La figura muestra los espectros  $M(f)$ ,  $U(f)$ ,  $Y(f)$  y  $\hat{M}(f)$ .



## Adquisición de la Portadora (3)

Caso 1: desplazamiento de frecuencia  $\Delta f$

---

- Asumamos

$$u(t) = A_c m(t) \cos(2\pi f_c t) \quad (2)$$

- Si el Rx genera una portadora con frecuencia  $f_c + \Delta f_c$ , entonces

$$\begin{aligned} r(t) \cos(2\pi(f_c + \Delta f_c)t) &= A_c m(t) \cos(2\pi f_c t) \cos(2\pi(f_c + \Delta f_c)t) \\ &= \frac{A_c m(t)}{2} \left[ \cos(2\pi(2f_c + \Delta f_c)t) + \cos(2\pi\Delta f_c t) \right] \end{aligned}$$

- Utilizando la técnica habitual de filtrado pasabajos podemos eliminar la componente centrada en  $2f_c$ .

## Adquisición de la Portadora (4)

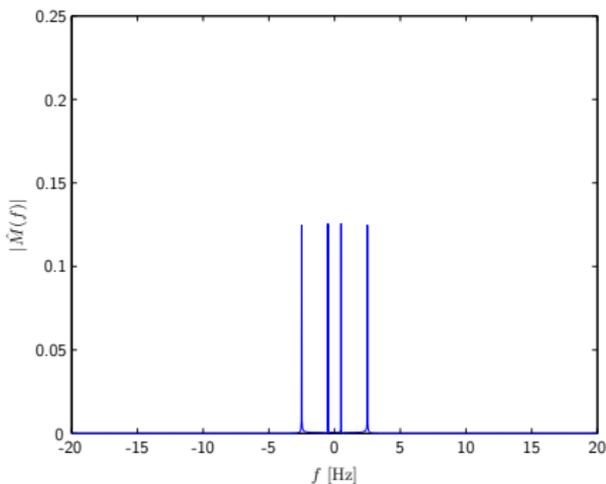
### Caso 1: desplazamiento de frecuencia $\Delta f$

---

- Sin embargo, la señal resultante es

$$\hat{m}(t) = \frac{A_c}{2} \cos(2\pi\Delta f_c t)m(t).$$

- Con un corrimiento  $\Delta f = 1$  Hz, (20 %), aparece un versión distorsionada del mensaje original.



# Adquisición de la Portadora (5)

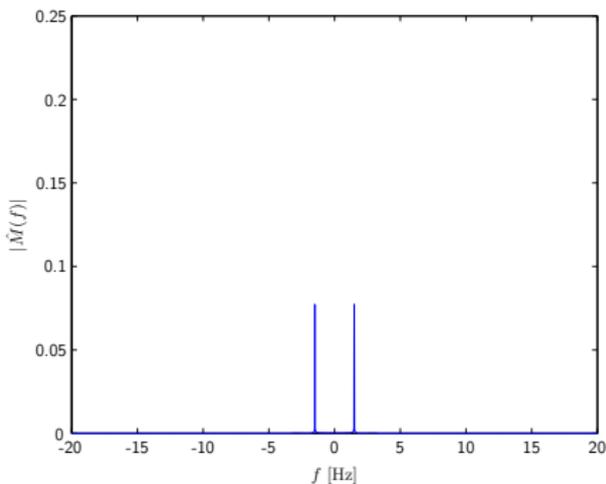
## Caso 2: desplazamiento angular $\delta$

---

- En caso de existir un desfase  $\delta$  entre el Tx y Rx entonces

$$\hat{m}(t) = \frac{A_c}{2} \cos(\delta)m(t). \quad (3)$$

- La señal recibida se puede atenuar hasta hacerse indetectable si  $\delta = \pi/2$ .
- En la figura  $\delta = \frac{2\pi}{5}$  ( $= 80\% \frac{\pi}{2}$ ).



## Adquisición de la Portadora (6)

---

- En general, la estimación de la señal recibida es

$$\hat{m}(t) = \frac{A_c}{2} \cos(2\pi\Delta f_c t + \delta)m(t). \quad (4)$$

- El efecto de desplazamientos de frecuencia del oscilador local se denomina “**jitter**”, y como vimos en el ejemplo, puede ser altamente destructivo.

## Adquisición de la Portadora (7)

---

- Se mitiga utilizando osciladores de cuarzo, los cuales son muy estables.

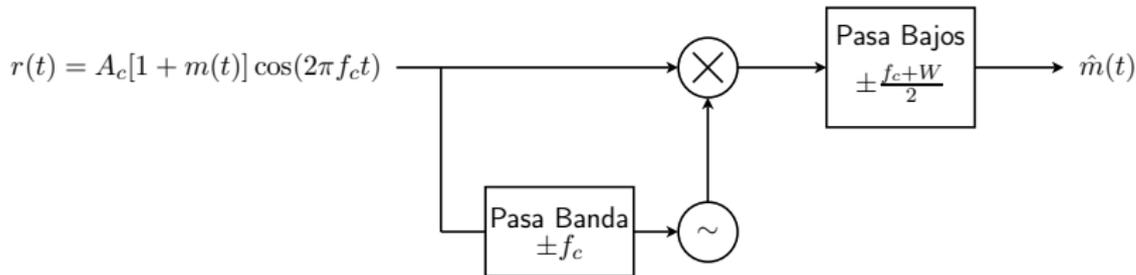


Oscilador de Cristal de Cuarzo  
DIP20.8\*13.2

## Adquisición de la Portadora (8)

---

- Esquema con portadora se envía el tono que es separado por un filtro sintonizado en  $f_c$ .



## Circuito Enclavado en Fase (1)

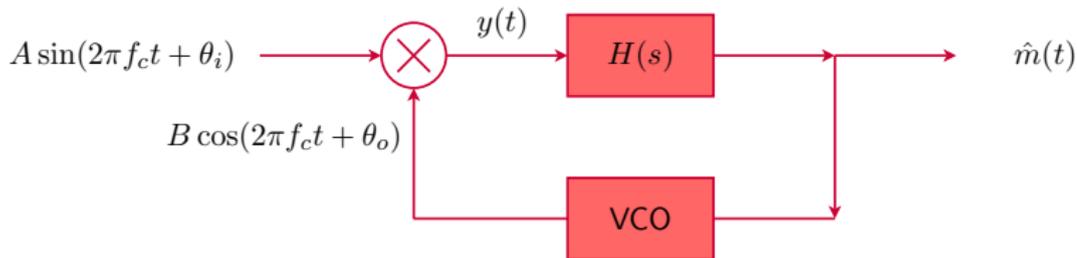
---

- El circuito enclavado en fase (PLL o Phase-Locked Loop) es un dispositivo que sigue la frecuencia y fase de una señal de entrada.
- Puede ser utilizado en demodulación síncrona AM con portadora suprimida o con un pequeño tono.
- También se utiliza en la demodulación de señales moduladas angularmente (bajo SNR).

## Circuito Enclavado en Fase (2)

---

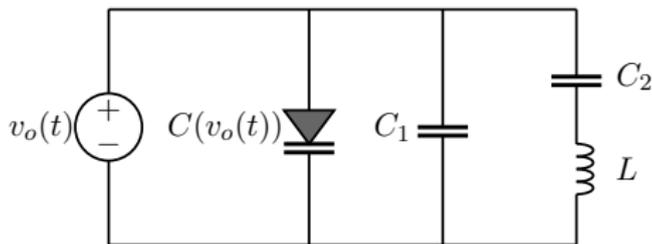
- El PLL tiene tres módulos:
  1. Oscilador controlado por voltaje (VCO)
  2. Multiplicador, para comparar o detectar la fase (PD).
  3. Filtro de Realimentación  $H(s)$



## Oscilador Controlado por Voltaje (1)

---

- VCO es un circuito cuya frecuencia de oscilación es controlada por una fuente de voltaje externa.
- Ejemplo: Oscilador  $LC$  donde la capacidad es implementada mediante un varicap o diodo sintonizador.



## Oscilador Controlado por Voltaje (2)

---

- La frecuencia de oscilación varía linealmente con  $\hat{m}(t)$ :

$$f(t) = f_c + c\hat{m}(t). \quad (5)$$

$c$ : constante del VCO.

$f_c$ : frecuencia libre de oscilación (si  $\hat{m}(t) = 0$ ).

## Funcionamiento del PLL (1)

---

- Consideremos que la entrada del PLL es

$$x(t) = A \sin(2\pi f_c t + \theta_i) \quad (6)$$

y que la salida del VCO es

$$z(t) = B \cos(2\pi f_c t + \theta_o). \quad (7)$$

- Luego

$$\begin{aligned} y(t) &= x(t)z(t) \\ &= AB \sin(2\pi f_c t + \theta_i) \cos(2\pi f_c t + \theta_o) \\ &= \frac{AB}{2} \left[ \sin(4\pi f_c t + \theta_i + \theta_o) + \sin(\theta_i - \theta_o) \right] \end{aligned}$$

## Funcionamiento del PLL (2)

---

- La señal  $y(t)$  pasa por el filtro pasabajos  $h(t)$ , de modo que

$$\hat{m}(t) = \frac{AB}{2} \left[ \sin(\theta_i - \theta_o) \right] \quad (8)$$

- Notemos que  $\theta_i - \theta_o = \text{error}(\theta)$ .
- Si  $\theta_i = \theta_o$  (condición de enclavamiento),

$$\hat{m}(t) = 0$$

y el sistema se encuentra en **régimen permanente**.

## Funcionamiento del PLL (3)

---

- Si la frecuencia de la señal de llegada cambia de

$$f_c \mapsto f_c + \Delta f_c$$

entonces

$$\begin{aligned}y(t) &= AB \sin(2\pi(f_c + \Delta f_c)t + \theta_i) \cos(2\pi f_c t + \theta_i) \\ &= \frac{AB}{2} \left[ \sin(4\pi f_c t + 2\theta_i + 2\pi \Delta f_c t) + \sin(2\pi \Delta f_c t) \right] \\ \Rightarrow \hat{m}(t) &= \frac{AB}{2} \sin(2\pi \Delta f_c t)\end{aligned}\tag{9}$$

## Funcionamiento del PLL (4)

---

- Como el VCO produce una frecuencia de oscilación proporcional al voltaje de excitación, entonces la frecuencia del VCO aumentará para seguir a la señal de entrada.
- De esta forma se reduce la diferencia angular entre ambas señales.
- Notar que si  $\Delta f_c < 0$ , entonces  $\hat{m}(t)$  disminuye lo que reduce la capacidad del *varicap*, y por consiguiente, la frecuencia de oscilación.
- Este mecanismo de enclavamiento en fase le da el nombre al dispositivo.

## Funcionamiento del PLL (5)

---

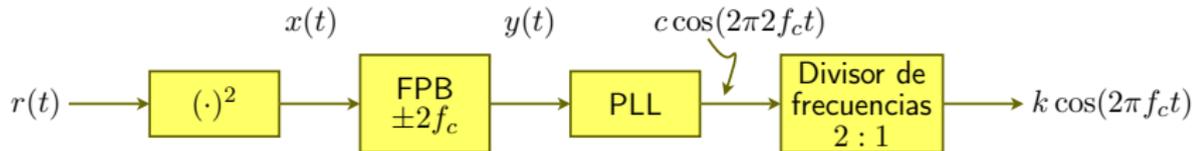
- El PLL puede “adquirir” la portadora dentro de un rango finito de frecuencias y desfases.
- El error se hace cero cuando  $\theta_i - \theta_o = n\pi$ , para algún entero  $n$ .
- Este intervalo de valores recibe el nombre de **rango de enclavamiento**.
- El PLL tiene un muy desempeño en presencia de ruido aditivo  $\Rightarrow$  utilizado en demoduladores FM.

# Adquisición de Portadora en DSB-SC (1)

Método  $r^2(t)$

---

- Consideremos el caso donde  $r(t) = m(t) \cos(2\pi f_c t)$ .



- Entonces

$$\begin{aligned}x(t) &= r^2(t) \\ &= m^2(t) \cos^2(2\pi f_c t) \\ &= \frac{m^2(t)}{2} \left[ 1 + \cos(2\pi 2f_c t) \right]\end{aligned}\tag{10}$$

## Adquisición de Portadora en DSB-SC (2)

Método  $r^2(t)$

---

- La señal  $m^2(t) \geq 0$ , por lo que tiene una componente DC no nula.

Luego,

$$\frac{1}{2}m^2(t) = k + \phi(t) \quad (11)$$

donde  $\phi(t)$  es una señal pasabajos de media cero.

$$x(t) = \frac{1}{2}m^2(t) + k \cos(2\pi 2f_c t) + \phi(t) \cos(2\pi 2f_c t).$$

- Al pasar por el filtro pasabandas sintonizado en  $\pm 2f_c$ , podemos eliminar el primer término.

## Adquisición de Portadora en DSB-SC (3)

Método  $r^2(t)$

---

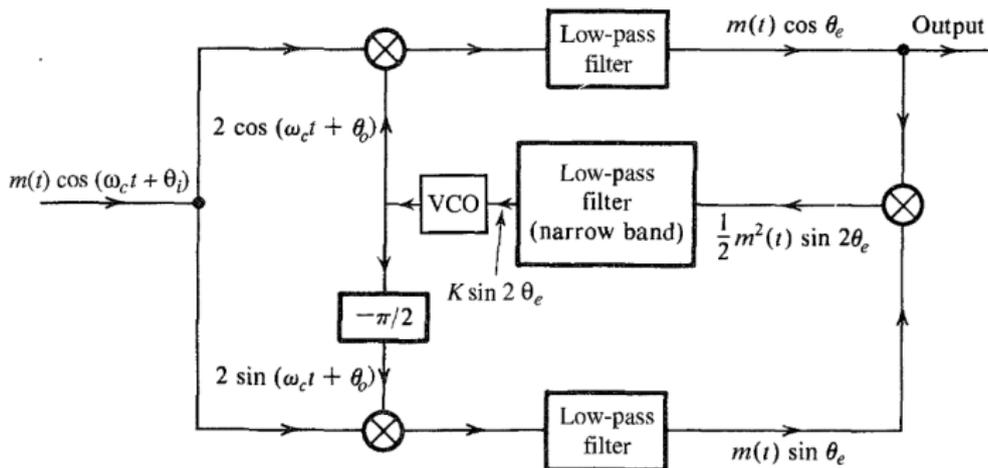
- Si el filtro es de alta calidad, entonces también podemos eliminar el tercer término.
- Luego

$$y(t) = k \cos(2\pi 2f_c t) \quad (12)$$

- El PLL se enclava en la fase de la señal, cuya salida es “re-escalada” en el dominio de la frecuencia para obtener el oscilador enclavado en fase.

# Adquisición de Portadora en DSB-SC (4)

## Loop de Costas



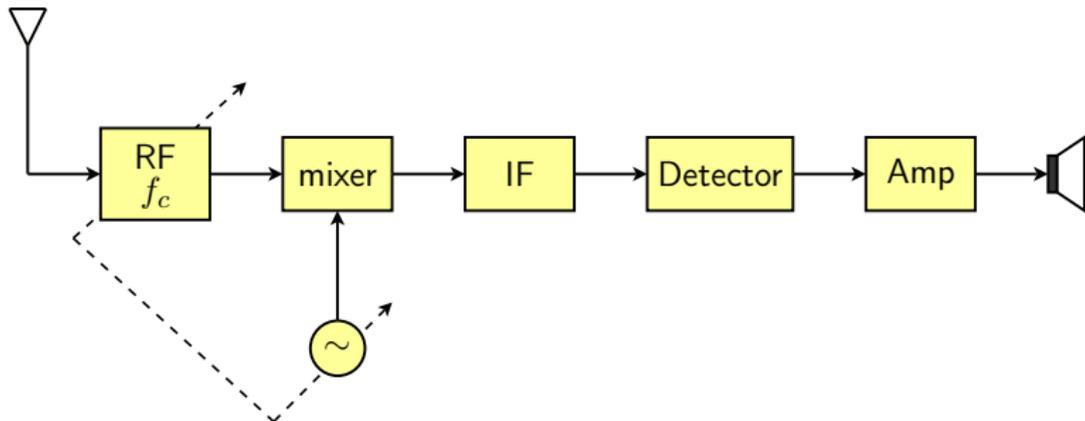
## Receptor AM Superheterodino (1)

---

- El receptor AM superheterodino es un sistema compuesto por los siguientes elementos:
  1. Sintonizador RF
  2. Mezclador de frecuencia (mixer)
  3. Amplificador de frecuencias (IF)
  4. Detector de envolvente
  5. Amplificador de audio.

## Receptor AM Superheterodino (2)

---



## Receptor AM Superheterodino (3)

---

- **Sintonizador RF:**
  - Ajusta la frecuencia del oscilador local a la frecuencia de interés  $f_c$ .
  - Suprime imágenes de bandas laterales que podrían eventualmente aparecer luego de la mezcla.
- **Mezclador de Frecuencias:** Traslada la señal desde la frecuencia  $f_c$  a una en la que las acciones de postfiltrado puedan realizarse en forma adecuada.

## Receptor AM Superheterodino (4)

---

- ○ Principio de Funcionamiento: Consideremos la señal

$$u(t) = m(t) \cos(2\pi f_c t) \quad (13)$$

- Queremos trasladar el espectro  $f_{IF}$ . ¿Cómo lo logramos?
- Multiplicamos  $u(t)$  por  $2 \cos(2\pi f_{mix} t)$ , donde  $f_{mix} = f_c + f_{IF}$

$$\begin{aligned} u(t) 2 \cos(2\pi f_{mix} t) &= m(t) 2 \cos(2\pi f_c t) \cos(2\pi f_{mix} t) \\ &= m(t) [\cos(2\pi(f_c + f_{mix})t) + \cos(2\pi(f_c - f_{mix})t)] \\ &= m(t) \cos(2\pi(2f_c + f_{IF})t) + m(t) \cos(2\pi f_{IF}t). \end{aligned} \quad (14)$$

## Receptor AM Superheterodino (5)

---

- - Utilizamos un filtro pasabajos para eliminar el espectro en  $2f_c + f_{IF}$ .
  - Si  $f_{mix} = f_c + f_{IF} \Rightarrow$  mezcla hacia arriba.
  - Si  $f_{mix} = f_c - f_{IF} \Rightarrow$  mezcla hacia abajo.
  - El procedimiento de cambio de frecuencias recibe el nombre de **heterodinaje**.
  - La frecuencia final es  $f_{IF} = 455$  kHz. Por lo tanto, la frecuencia de mezcla es

$$f_{mix} = f_c + 455 \text{ kHz.}$$

(mezcla hacia arriba).

- - Esto le da el nombre de **superheterodino**.

## Receptor AM Superheterodino (6)

---

- ○ Motivo: es más fácil diseñar un filtro pasabandas estrecho para una frecuencia fija (455 kHz en el caso de AM comercial) que para una frecuencia móvil de ancho de banda 10 kHz (ancho de banda de una señal de audio AM).
- El sintonizador RF no provee de suficiente selectividad en la banda en la que sintoniza a la portadora.
- La banda comercial de AM corresponde al rango 520 kHz a 1610 kHz.
- Por lo tanto, la frecuencia de mezcla está en el rango 975 kHz a 2,065 MHz.

## Receptor AM Superheterodino (7)

---

- **Amplificador de Frecuencia Intermedia (IF):** Elimina los canales laterales luego de la mezcla.  
Es un filtro altamente selectivo.

$$y_{IF}(t) = [A + m(t)] \cos(2\pi f_{IF}t). \quad (15)$$

- **Detector de Envolvente.** Es un filtro pasabajos que permite eliminar la portadora.

## Importancia del Receptor AM Superheterodino (1)

---

- Inventado por E. H. Armstrong, es pieza fundamental de receptores AM, FM y de televisión analógica.
- Antes de la introducción de este receptor, la sintonización debía hacerse en forma exclusiva utilizando filtros RF.
- La mala selectividad obligaba a utilizar varias etapas de filtrado (circuitos resonantes).



## Importancia del Receptor AM Superheterodino (2)

---

- Resultaba muy difícil sincronizar todos los circuitos sintonizadores en una frecuencia única.
- Se hacía un uso del espectro muy ineficiente.
- Con la penetración del receptor superheterodino se pudo acomodar mayor número de portadoras y simplificar notablemente el funcionamiento del receptor.

## Importancia del Receptor AM Superheterodino (3)

---



## Resumen

---

- Hemos estudiado los efectos del jitter y desfase angular en Tx AM.
- Solución síncrona: PLL
- Implementaciones: Loop de Costas y Cuadramiento de la señal recibida.
- Receptor superheterodino para AM.

## Lecturas

---

- Salehi & Proakis, *Communication Systems Engineering*, Capítulo 3, secciones 3.2.5, 3.2.6, 3.4.1 y 3.4.2.