

A satellite is shown in the upper left corner of the slide, orbiting Earth. The satellite has two large solar panel arrays and is emitting a blue laser beam towards the ground. The Earth's surface is visible below, showing clouds and landmasses.

# **IC 323 -Comunicación de Datos**

## **Unidad N°5: Modulación Analógica, de Pulso y Digital**





# Modulación

- Es el proceso por el cual un parámetro o propiedad de una señal se hace variar en función de una segunda señal
- En modulación en amplitud se hace variar la amplitud de una senoide con frecuencia y fase fijas



# Modulación

- Limitaciones de la comunicación directa:
  - Propagación
  - Interferencias

Por ejemplo: Una conversación entre dos personas puede ser escuchada solamente a unos pocos metros





# Ondas Electromagnéticas

- Propagación de ondas electromagnéticas:
- Solo se puede radiar una señal en forma efectiva si la antena radiadora es del orden de al menos un décimo la longitud de onda de las señales
- Para el caso de la voz,

$$f_{max} = 10.000Hz \rightarrow \lambda_{min} = 30.000 \text{ mts.}$$

El proceso de modulación traslada el espectro a un rango superior de frecuencias, donde es más fácil radiarlo





# Principio de la Modulación

- Se considera la propiedad de Convolución de la Transformada de Fourier

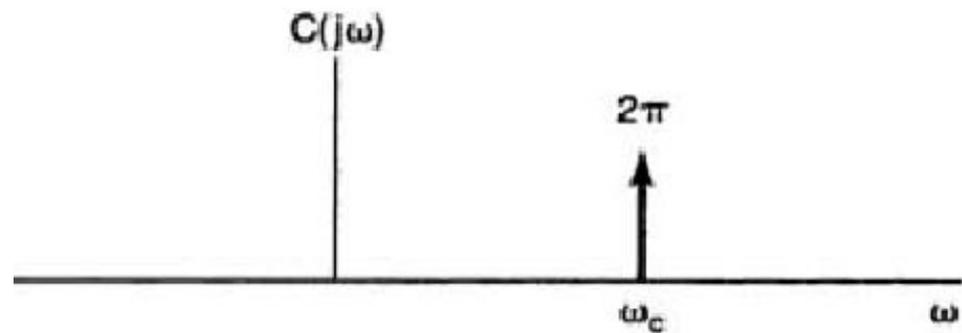
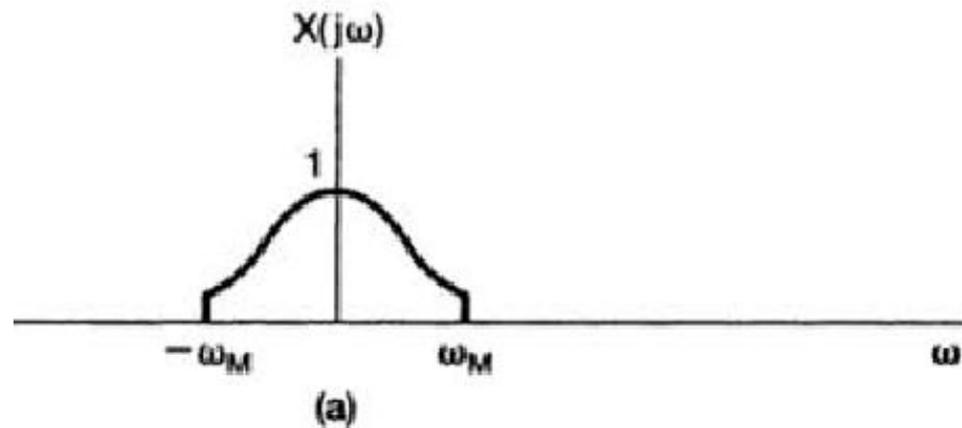
$$y(t) = h(t)x(t) \xleftrightarrow{TF} Y(j\omega) = \frac{1}{2\pi} H(j\omega) * X(j\omega)$$

- y que toda señal convolucionada con un impulso, resulta en la misma señal desplazada a la ubicación del impulso



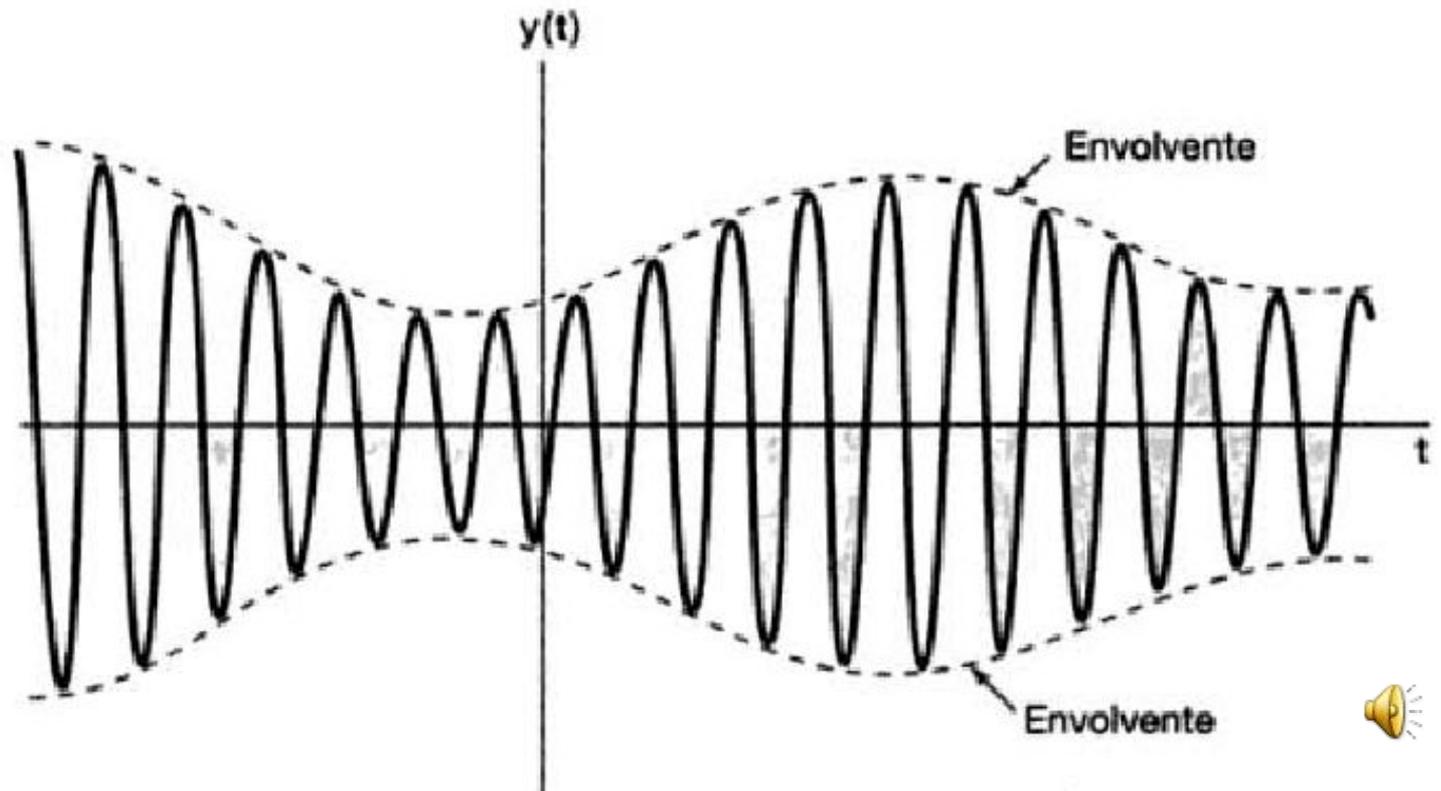
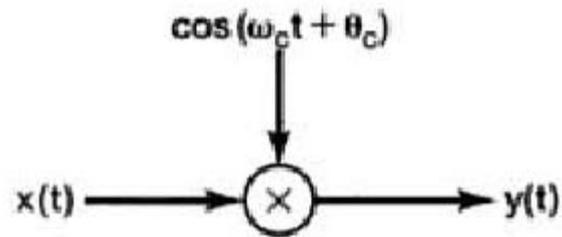
# Principio de la Modulación

- Convolución en el espectro:



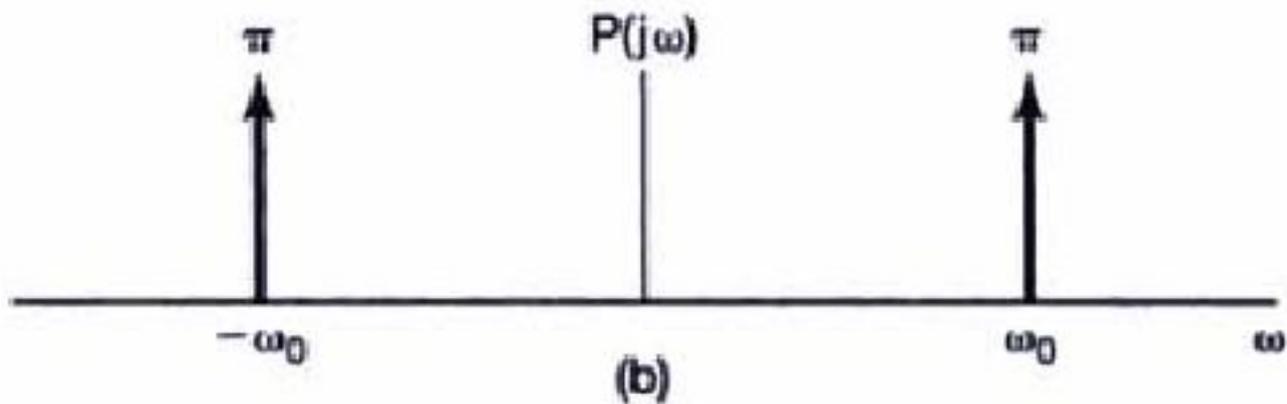
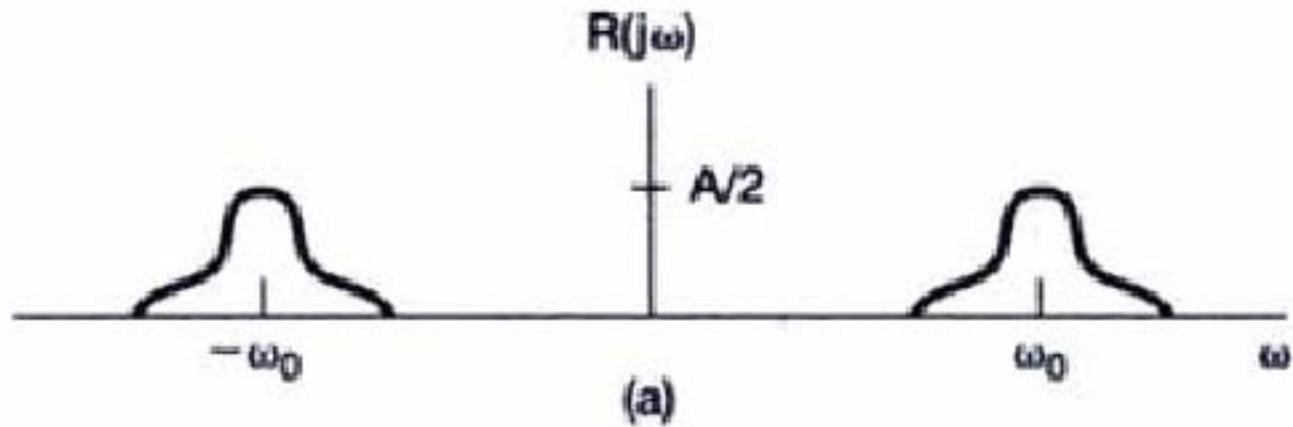


# Principio de la Modulación



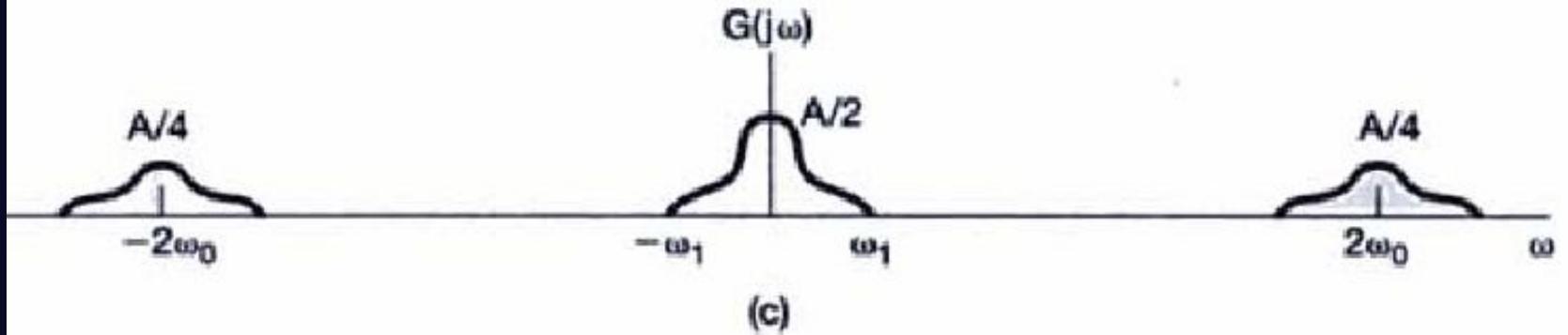


# Demodulación





# Demodulación





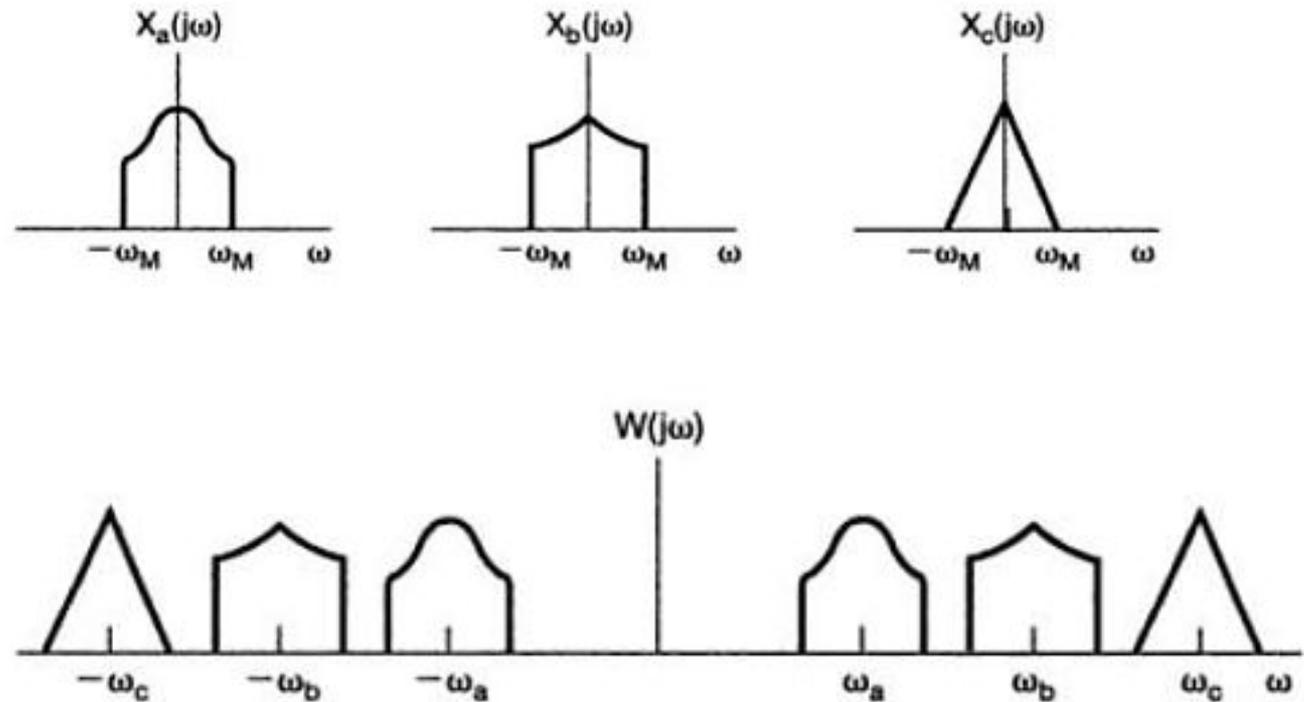
## Interferencias:

- No podemos transmitir directamente más de una señal a la vez porque causaríamos interferencias entre las señales transmitidas





# Multiplexación por División de Frecuencia





# Modulación en amplitud: Sistemas de Portadora Suprimida (AM-PS)

- Ecuación general de una senoide

$$\phi(t) = a(t) \cos [\omega_c t + \gamma(t)]$$

envolvente

Frecuencia  
de la  
portadora

Modulación de  
fase

- En modulación en amplitud se tiene:

$$\phi(t) = f(t) \cos \omega_c t$$

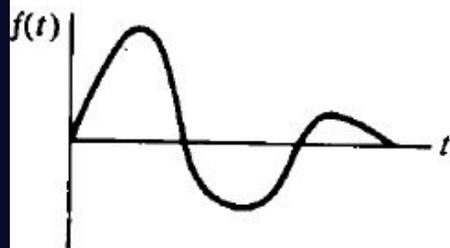
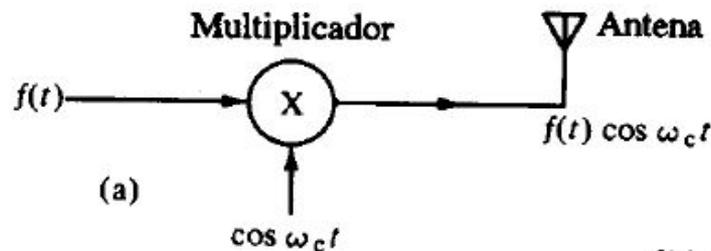
- Aplicando la TF resulta la densidad espectral de amplitud

$$\Phi(\omega) = \frac{1}{2}F(\omega + \omega_c) + \frac{1}{2}F(\omega - \omega_c)$$

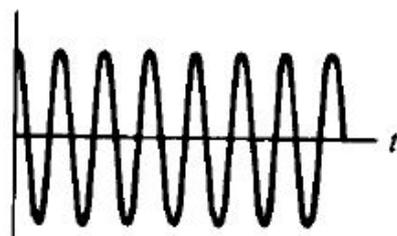




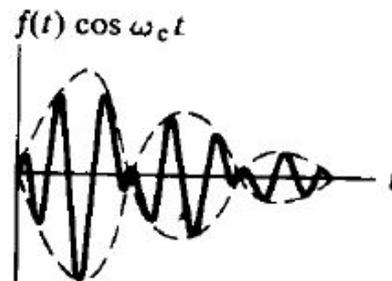
# Modulación en amplitud: Sistemas de Portadora Suprimida (AM-PS)



(b)



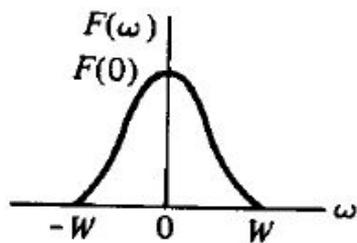
(c)



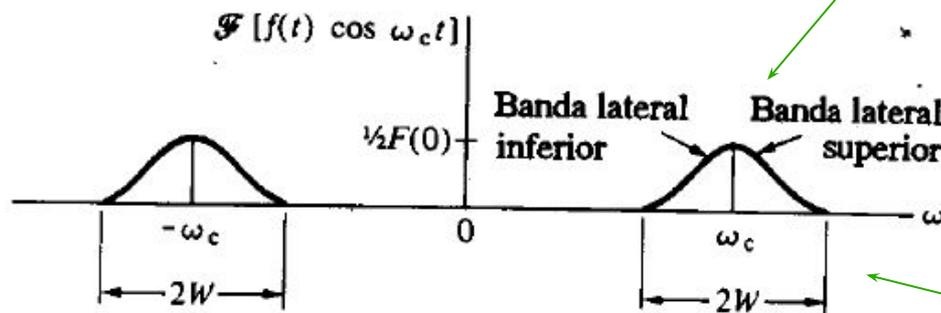
(d)



No presenta una portadora identificable



(e)



(f)

Se duplica el ancho de banda



## Modulación en amplitud: Sistemas de Portadora Suprimida (DSB-PS)

- Se suele llamar DSB-SC
- Para recuperar la señal original es preciso otra traslación en frecuencia (demodulación o detección):

$$\begin{aligned}\phi(t) \cos \omega_c t &= f(t) \cos^2 \omega_c t \\ &= \frac{1}{2}f(t) + \frac{1}{2}f(t) \cos 2\omega_c t\end{aligned}$$





# Modulación en Amplitud: Sistemas de Portadora Suprimida (AM-PS)

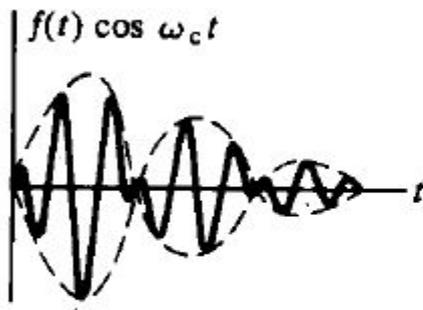
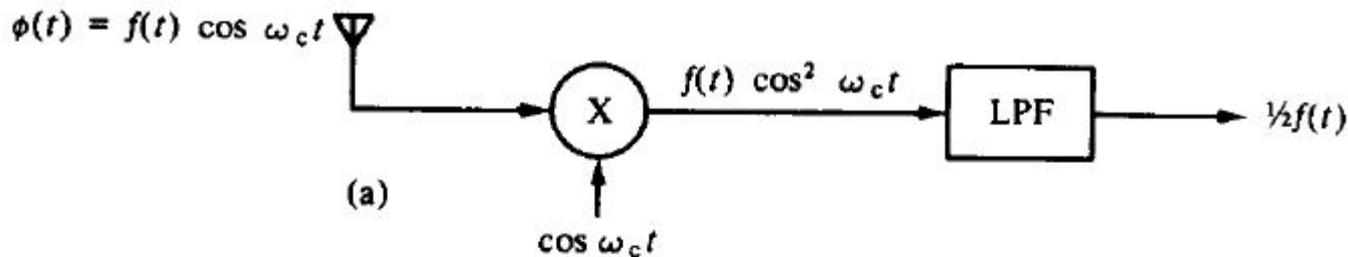
- En el dominio de la frecuencia resulta

$$\mathcal{F}\{\phi(t) \cos \omega_c t\} = \frac{1}{2}F(\omega) + \frac{1}{4}F(\omega + 2\omega_c) + \frac{1}{4}F(\omega - 2\omega_c)$$

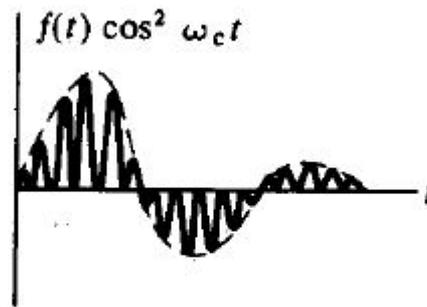




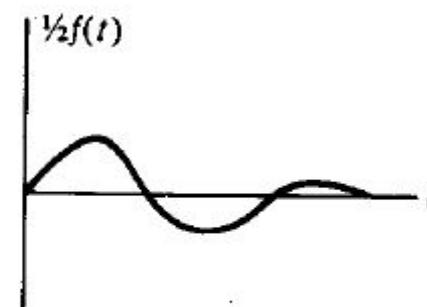
# Modulación en amplitud: Sistemas de Portadora Suprimida (DSB-PS)



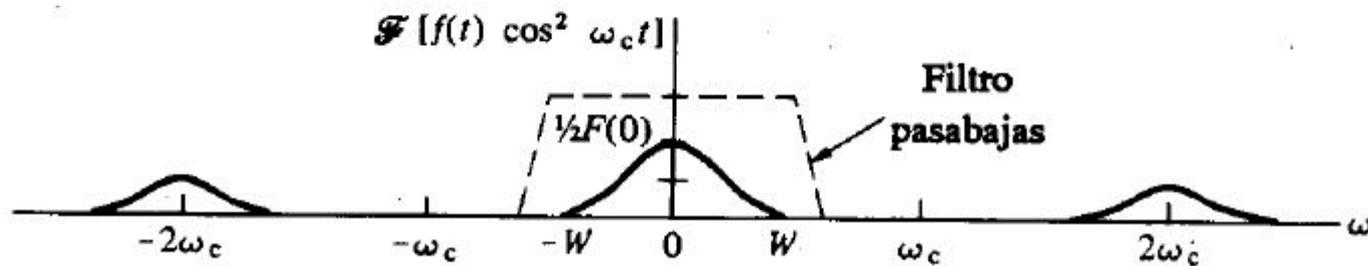
(b)



(c)



(d)



(e)



## Modulación en amplitud: Sistemas de Portadora Suprimida (DSB-PS)

- Error de fase y frecuencia, descripción analítica

$$\begin{aligned}\phi(t) \cos [(\omega_c + \Delta\omega)t + \theta_0] &= f(t) \cos \omega_c t \cos [(\omega_c + \Delta\omega)t + \theta_0] \\ &= \frac{1}{2}f(t) \cos [(\Delta\omega)t + \theta_0] \\ &\quad + \frac{1}{2}f(t) \cos [(2\omega_c + \Delta\omega)t + \theta_0].\end{aligned}$$

Señal recuperada



- Es necesario sincronizar fase y frecuencia (detección síncrona o coherente, dos osciladores, detección homodina, un solo oscilador)

A satellite is shown in the upper left corner of the slide, orbiting Earth. The satellite has solar panels and is emitting a blue laser beam towards the ground. The background is a dark blue space with the Earth's surface visible.

# Modulación en amplitud: Gran portadora (DSB-LC)

- Se incorpora en la señal a transmitir la información de la portadora
- Es preciso que en la señal a transmitir no sea de interés la frecuencia 0
- Usado por las estaciones de radio AM
- Matemáticamente

$$\phi_{AM}(t) = f(t) \cos \omega_c t + A \cos \omega_c t$$

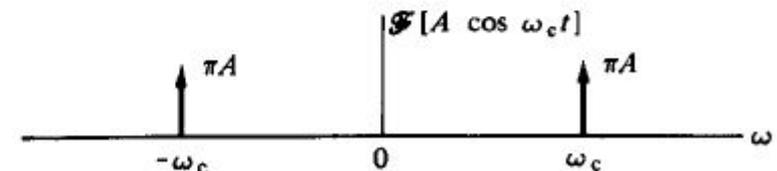
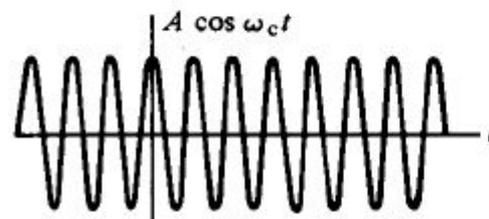
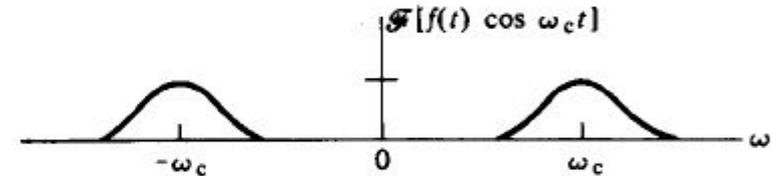
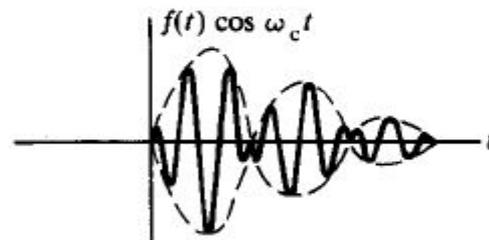
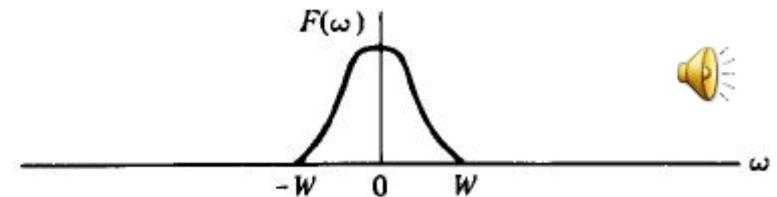
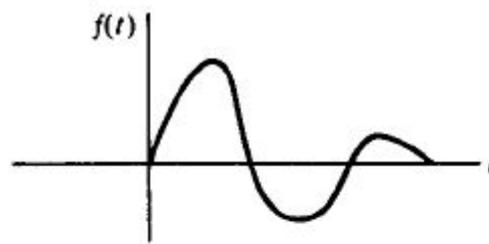




# Modulación en Amplitud: Gran Portadora (DSB-LC)

- La densidad espectral es:

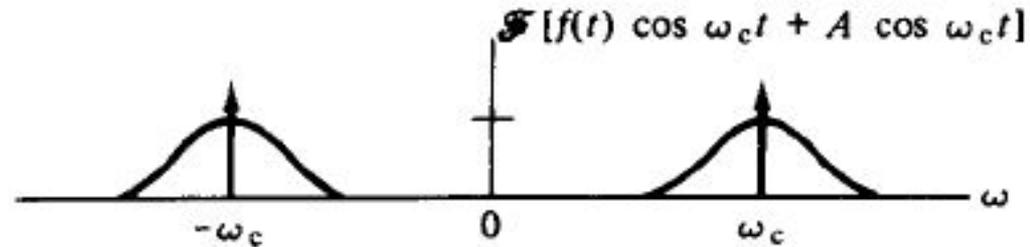
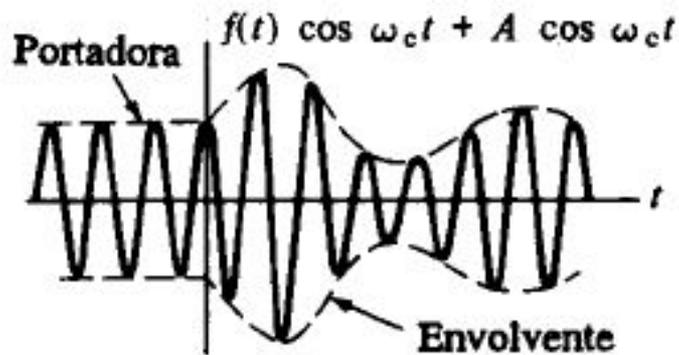
$$\Phi_{AM}(\omega) = \frac{1}{2}F(\omega + \omega_c) + \frac{1}{2}F(\omega - \omega_c) + \pi A \delta(\omega + \omega_c) + \pi A \delta(\omega - \omega_c).$$





# Modulación en amplitud: Gran portadora (DSB-LC)

- Combinando todo resulta:



- La demodulación se reduce a la detección de la envolvente



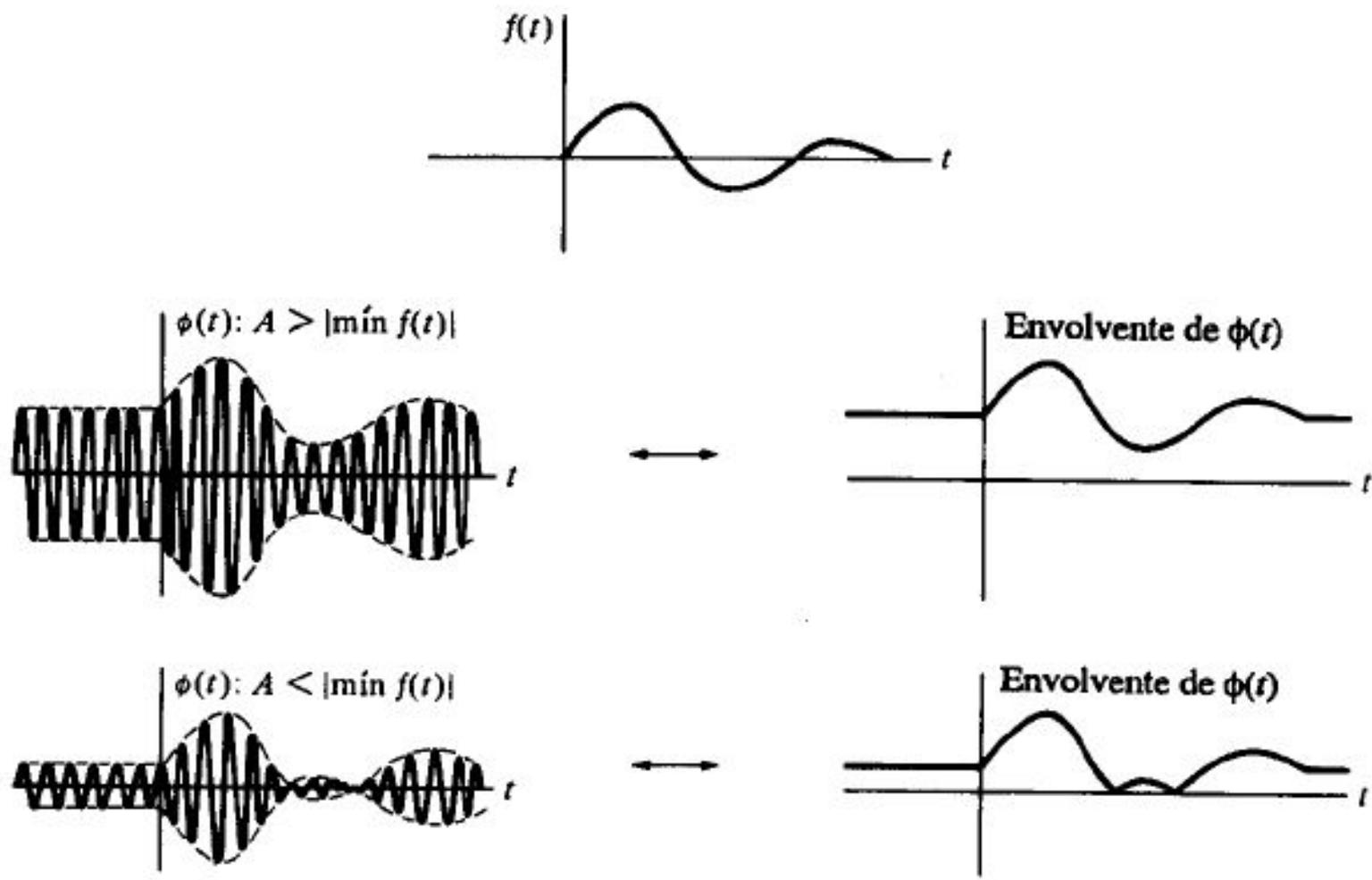


Figura 5.17 Importancia de una portadora suficiente en las señales DSB-LC.





# Modulación en amplitud: Gran portadora (DSB-LC)

- La potencia de la portadora se desperdicia para la transmisión de información
- Análisis de la potencia:

$$\overline{\phi_{AM}^2(t)} = A^2 \overline{\cos^2 \omega_c t} + \overline{f^2(t) \cos^2 \omega_c t} + 2A \overline{f(t) \cos^2 \omega_c t},$$
$$\overline{\phi_{AM}^2(t)} = A^2 \overline{\cos^2 \omega_c t} + \overline{f^2(t) \cos^2 \omega_c t}$$
$$= A^2/2 + \overline{f^2(t)}/2.$$

- La potencia total es la suma de una potencia portadora  $P_c$  y una potencia de banda lateral  $P_s$





## Análisis de Potencia DSB-LC

$$P_t = \frac{1}{2}A^2 + \frac{1}{2}\overline{f^2(t)} = P_c + P_s$$

- La fracción de potencia contenida en bandas laterales es

$$\mu = \frac{P_s}{P_t} = \frac{\overline{f^2(t)}}{A^2 + \overline{f^2(t)}}$$





# Análisis de potencia DSB-LC

- Para el caso de una senoide simple

$$\begin{aligned}\phi_{AM}(t) &= A(1 + m \cos \omega_m t) \cos \omega_c t \\ &= A \cos \omega_c t + mA \cos \omega_m t \cos \omega_c t ,\end{aligned}$$

- Se tiene  $\overline{\phi_{AM}^2(t)} = \frac{1}{2}A^2 + \left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{1}{2}\right)m^2A^2,$

$$\mu = \frac{m^2}{2 + m^2}.$$

- Como  $m \leq 1$ , la eficiencia es como mucho 33%
- ¿Cuál es la eficiencia de DSB-SC?





## Ejemplo:

- Una estación de radio transmite una potencia promedio portadora total de 40kW y usa un índice de modulación de 0,707. Calcular:
  - a) Potencia promedio total de salida
  - b) La eficiencia de la transmisión
  - c) La amplitud pico de la portadora si la antena está representada por una carga resistiva de  $50\Omega$





## Ejemplo:

- De la ecuación anterior:

$$P_t = P_c(1 + m^2/2).$$

Para  $m = 0.707$ ,

$$P_t = (1 + \frac{1}{4})P_c = \frac{5}{4}P_c,$$

$$P_t = 50 \text{ kW}.$$

- ASI,

$$\mu = \frac{(0.707)^2}{2 + (0.707)^2} = \frac{0.500}{2.500} = 20\%$$



## Ejercicio DBS-LC

- Para el punto c, tenemos

$$P_c = \frac{A^2}{2R},$$

$$A^2 = 2RP_c = 4 \times 10^6,$$

$$(1 + m)A = 3414 \text{ V.}$$



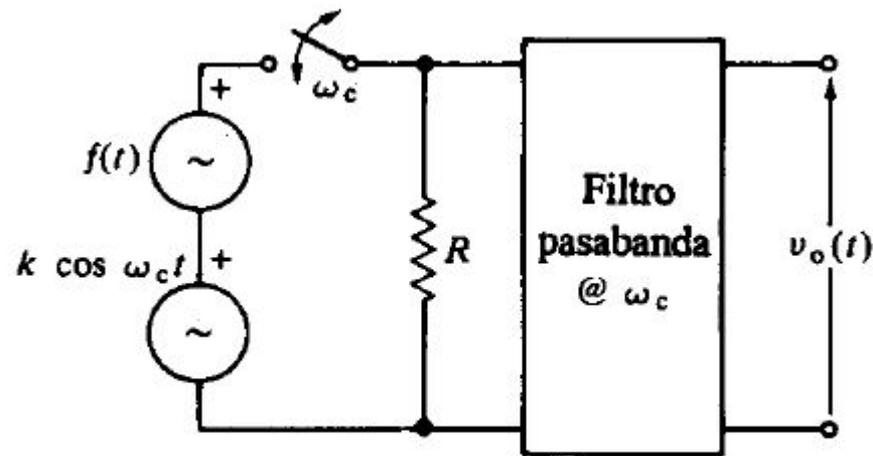


# Generación de Señales DSB-LC

- La forma más sencilla (del punto de vista conceptual) es producir una señal DSB-SC y luego agregarle una portadora
- Sin embargo es más fácil generar de forma directa
- El modulador de conmutación se puede extender directamente agregando un nivel de cd antes de la conmutación

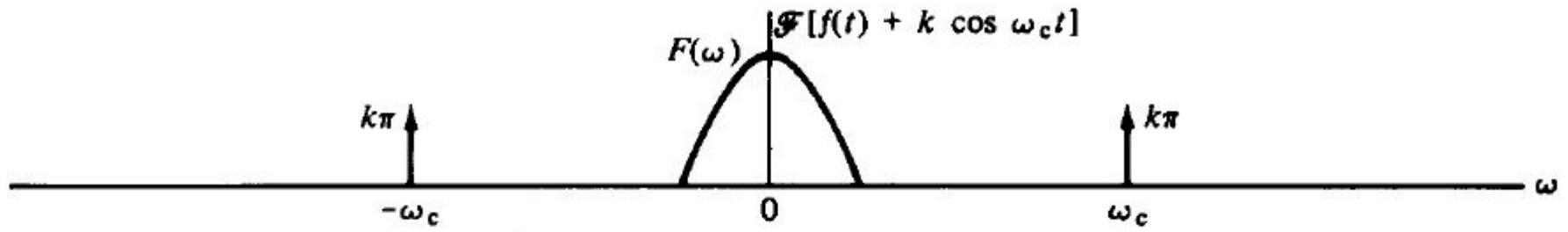
# Generación de Señales DSB-LC

- Otra posibilidad es agregar a  $f(t)$  una portadora antes de la conmutación

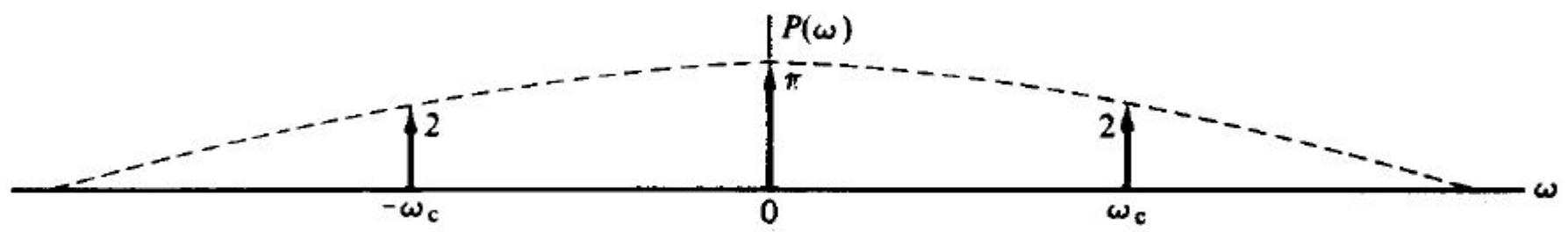


(a)

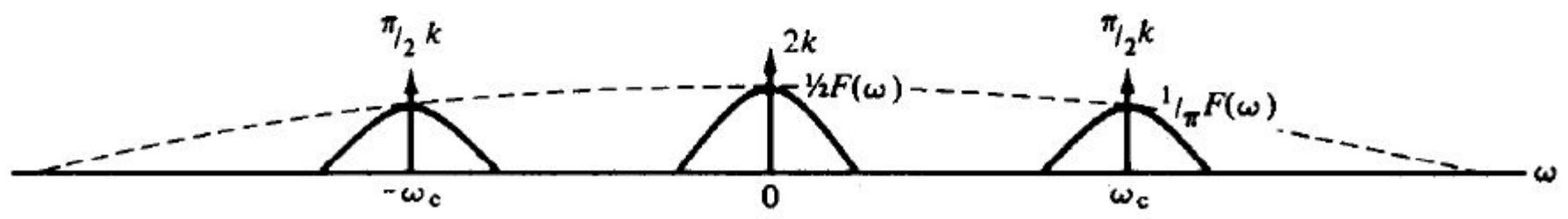
- Al multiplicar por una señal cuadrada periódica, aparecen las componentes deseadas



(c)



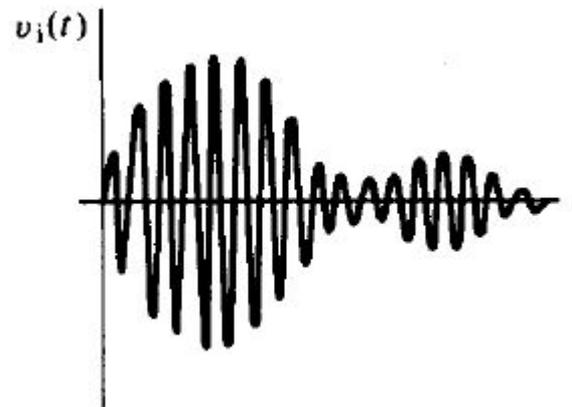
(d)



(e)

# Detección de señales DSB-LC

- Se puede demodular de forma síncrona
- Pero existen formas más simples ya que la señal de interés es la envolvente de la señal modulada



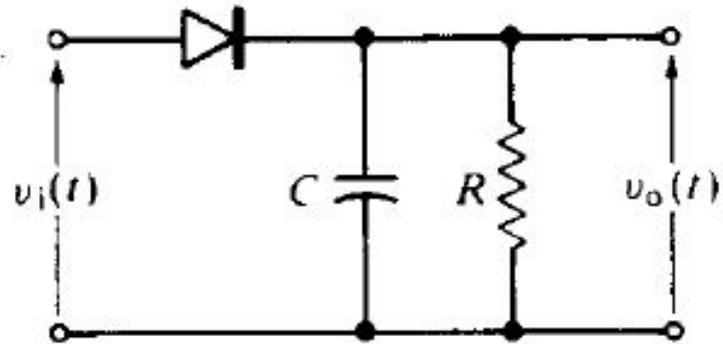
(a)





# Detección de señales DSB-LC

- El circuito más simple es un circuito no lineal de carga rápida y descarga lenta

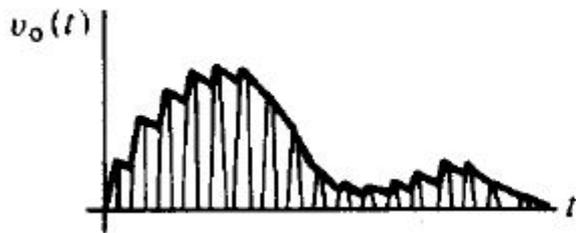


- El capacitor se carga en los ciclos positivos y se descarga a través de la resistencia en los negativos

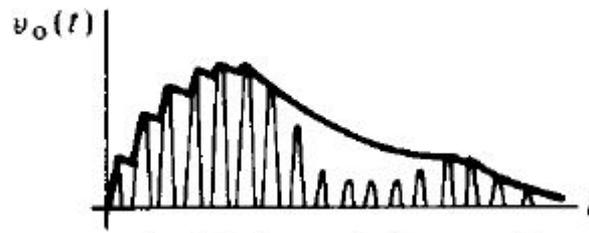


# Detección de señales DSB-LC

- Selección de RC:



c) RC correcta



d) RC demasiado grande



e) RC demasiado pequeña

- La máxima pendiente negativa de la envolvente no debe superar la pendiente de descarga



## Detección de señales DSB-LC

- A continuación se incorpora un filtro pasabajos para eliminar el contenido armónico no deseado
- Para eliminar el nivel de dc se puede usar un capacitor de desacoplamiento
- Esto hace que no se pueda transmitir información en  $\omega=0$ .
- Este detector es simple, eficiente y barato y de uso casi universal



## Modulación por Banda Lateral Unica (SSB)

- DSB duplica el ancho de banda
- Sin embargo, para señales reales:

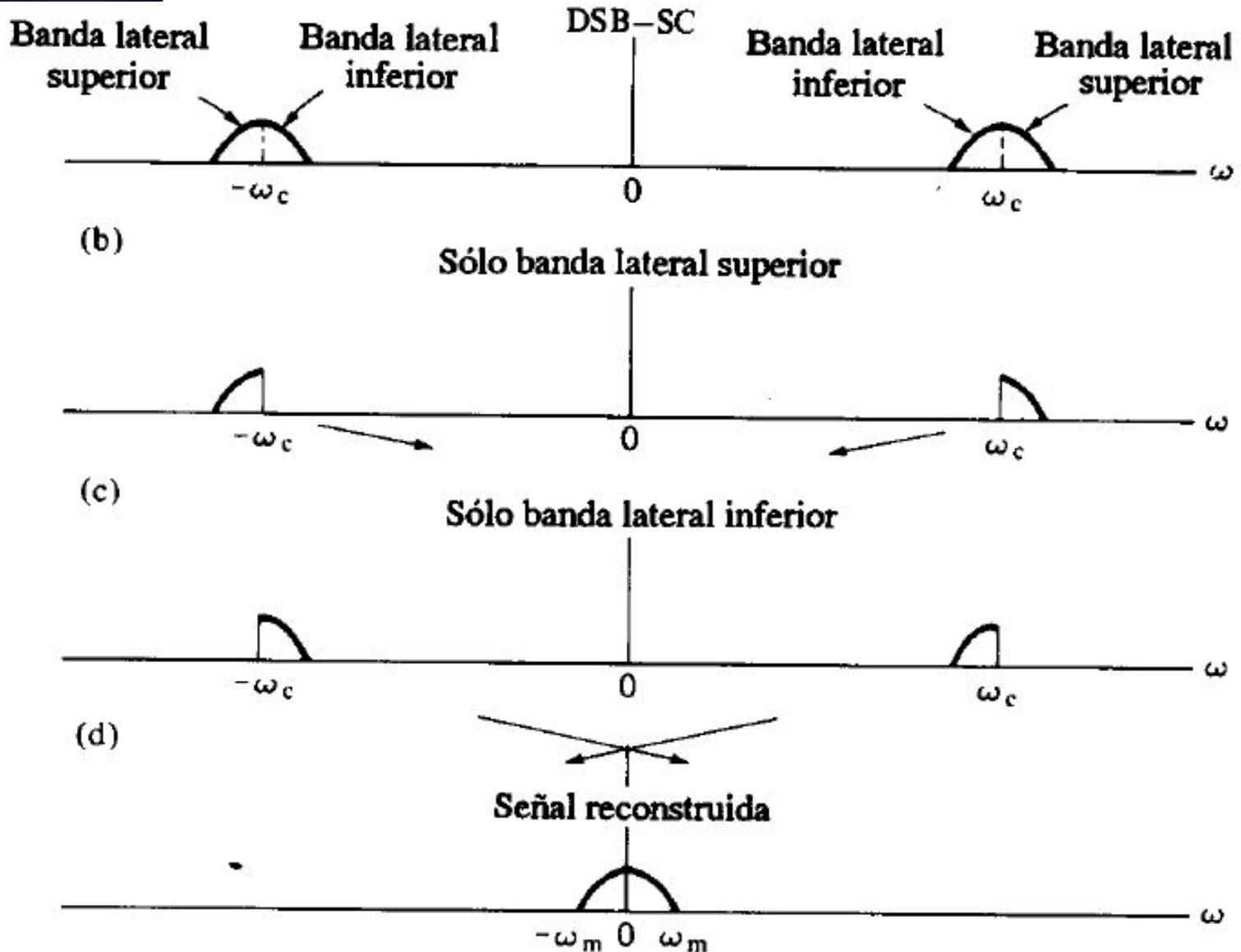
$$F(-\omega) = F^*(\omega)$$

- Por qué no transmitir solo una de las bandas laterales?





# Modulación por Banda Lateral Unica (SSB)





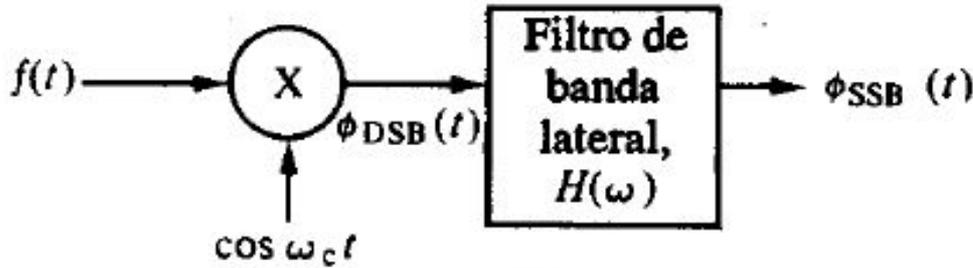
## Generación de señales SSB

- La forma más rápida es generar DSB y luego filtrar
- Sin embargo el filtro debe tener características muy abruptas

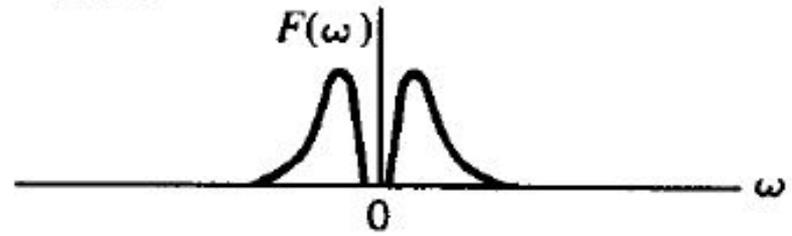




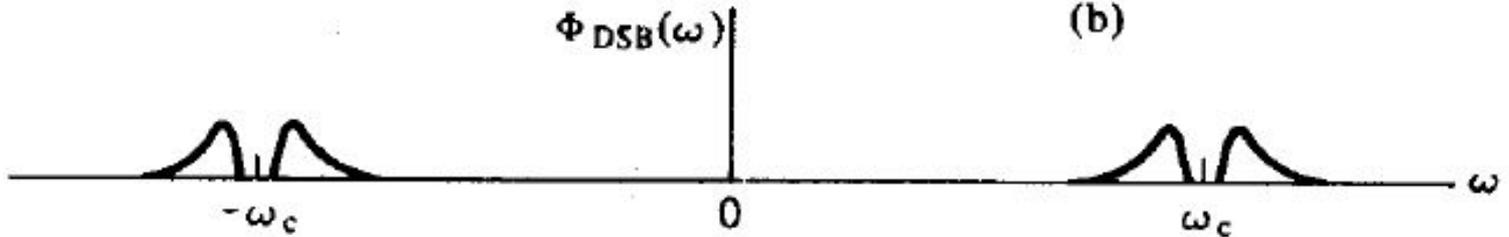
# Generación de señales SSB



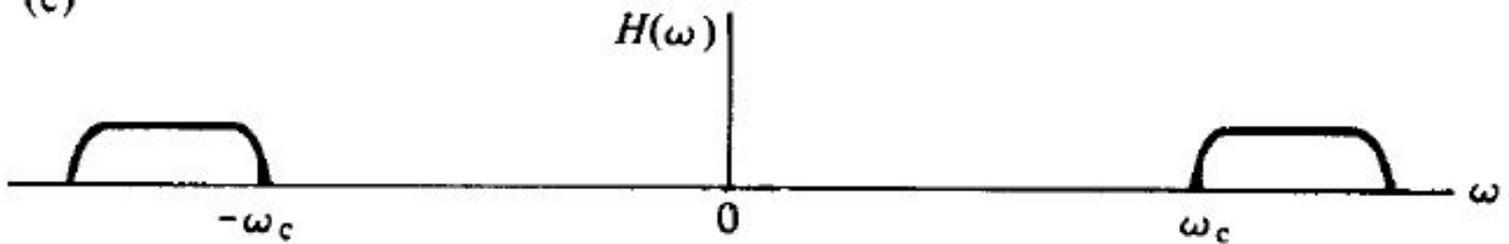
(a)



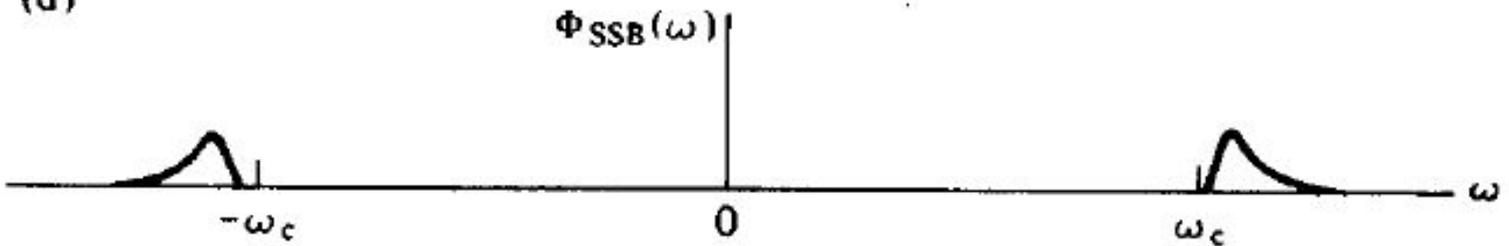
(b)



(c)



(d)



(e)



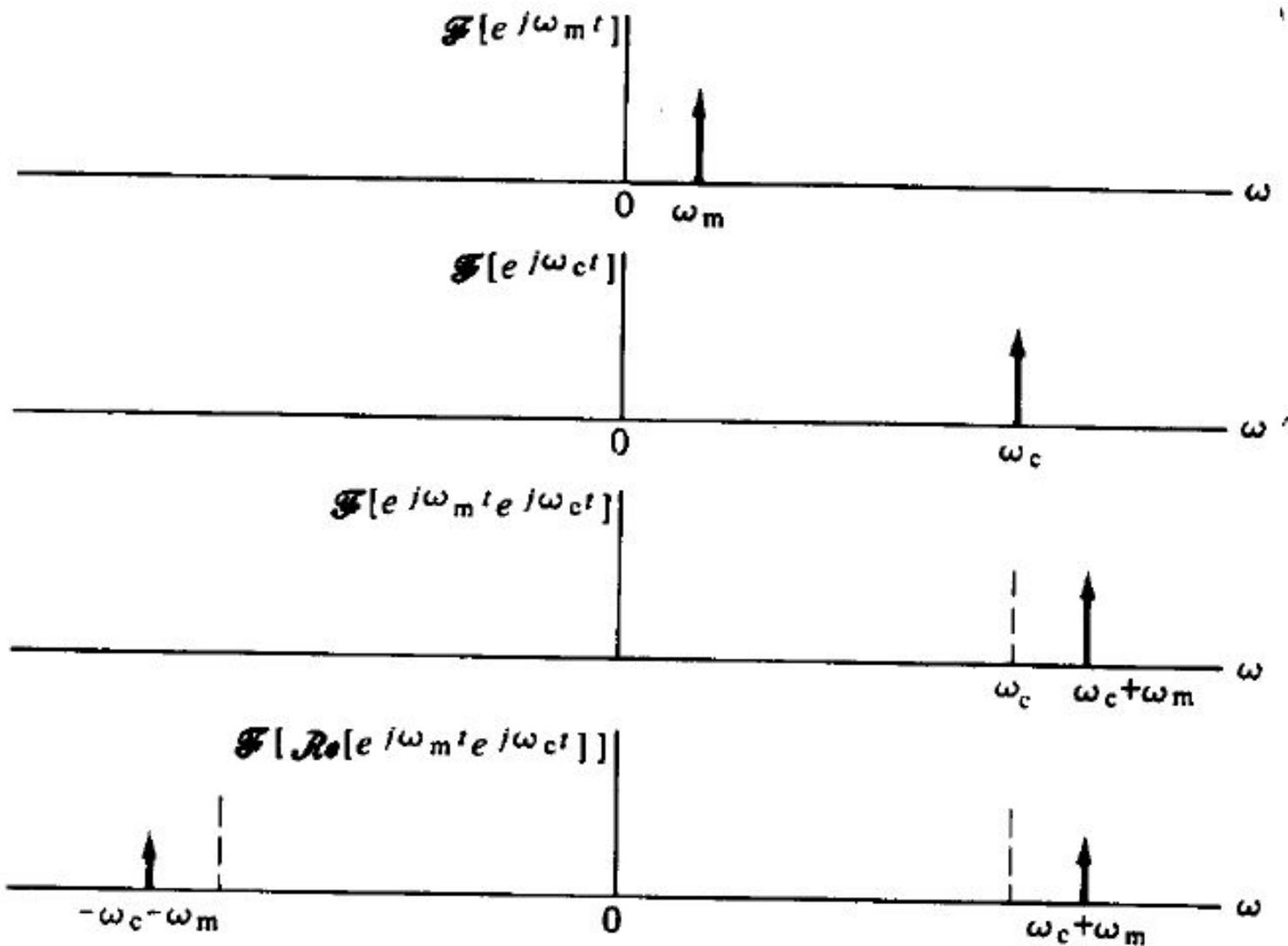
## Generación de señales SSB

- También se pueden generar señales SSB mediante una adecuada puesta en fase de las señales:
  - Supongamos una señal exponencial compleja de frecuencia simple.
  - Considerando la señal moduladora  $f(t) = e^{j\omega_m t}$  y la portadora  $e^{j\omega_c t}$ .
  - Tomando la parte real se obtiene

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\{e^{j\omega_m t} e^{j\omega_c t}\} &= \operatorname{Re}\{e^{j\omega_m t}\} \operatorname{Re}\{e^{j\omega_c t}\} - \operatorname{Im}\{e^{j\omega_m t}\} \operatorname{Im}\{e^{j\omega_c t}\} \\ &= \cos \omega_m t \cos \omega_c t - \operatorname{sen} \omega_m t \operatorname{sen} \omega_c t. \end{aligned}$$



# Generación de señales SSB





# Generación de señales SSB

- Puede concluirse que la banda lateral superior puede expresarse como

$$\phi_{SSB_+}(t) = \cos \omega_m t \cos \omega_c t - \text{sen } \omega_m t \text{ sen } \omega_c t .$$

- Para la banda lateral inferior

$$\phi_{SSB_-}(t) = \cos \omega_m t \cos \omega_c t + \text{sen } \omega_m t \text{ sen } \omega_c t .$$

- Generalizando para cualquier señal  $f(t)$

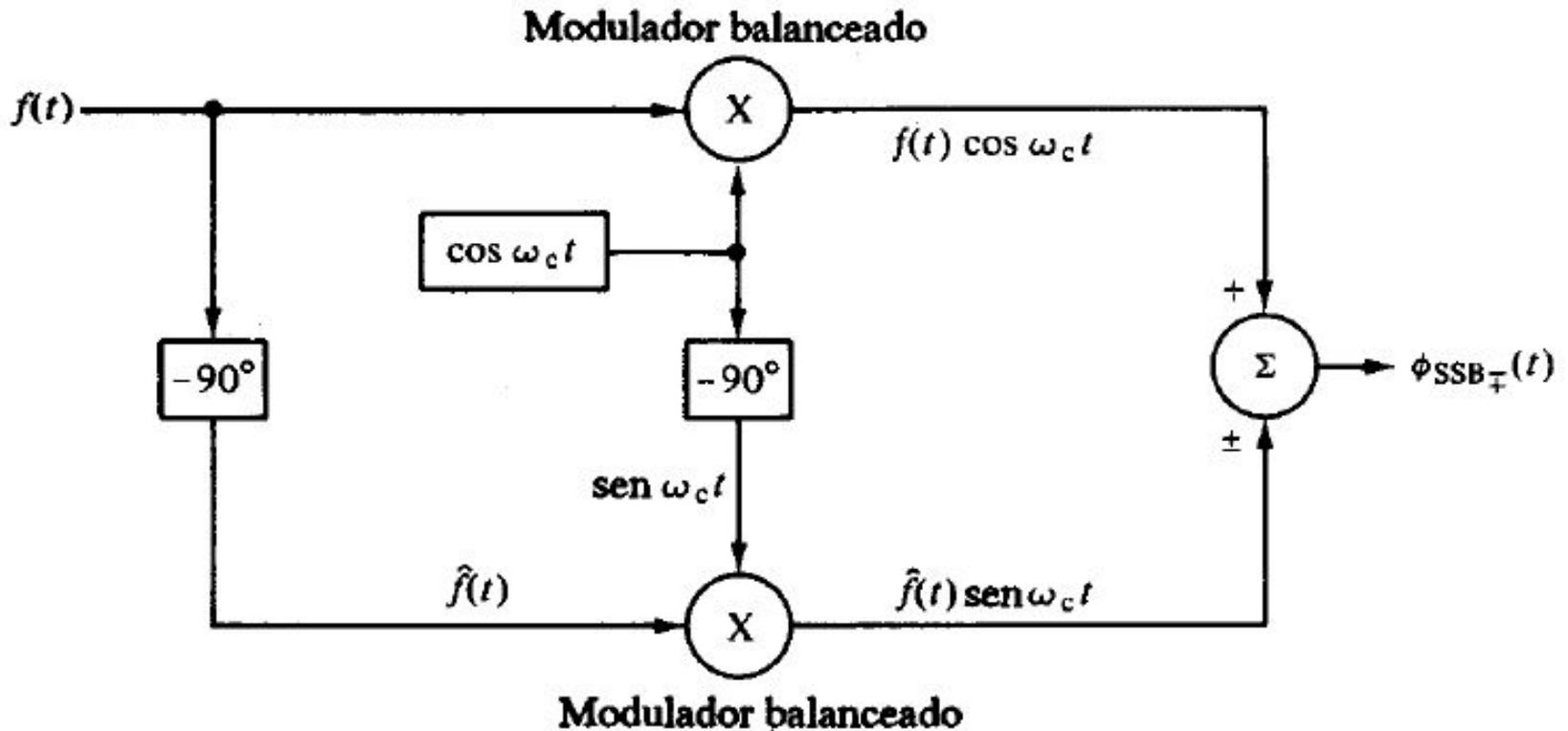
$$\phi_{SSB_{\mp}}(t) = f(t) \cos \omega_c t \pm \hat{f}(t) \text{ sen } \omega_c t$$

señal  
desfasada 90°



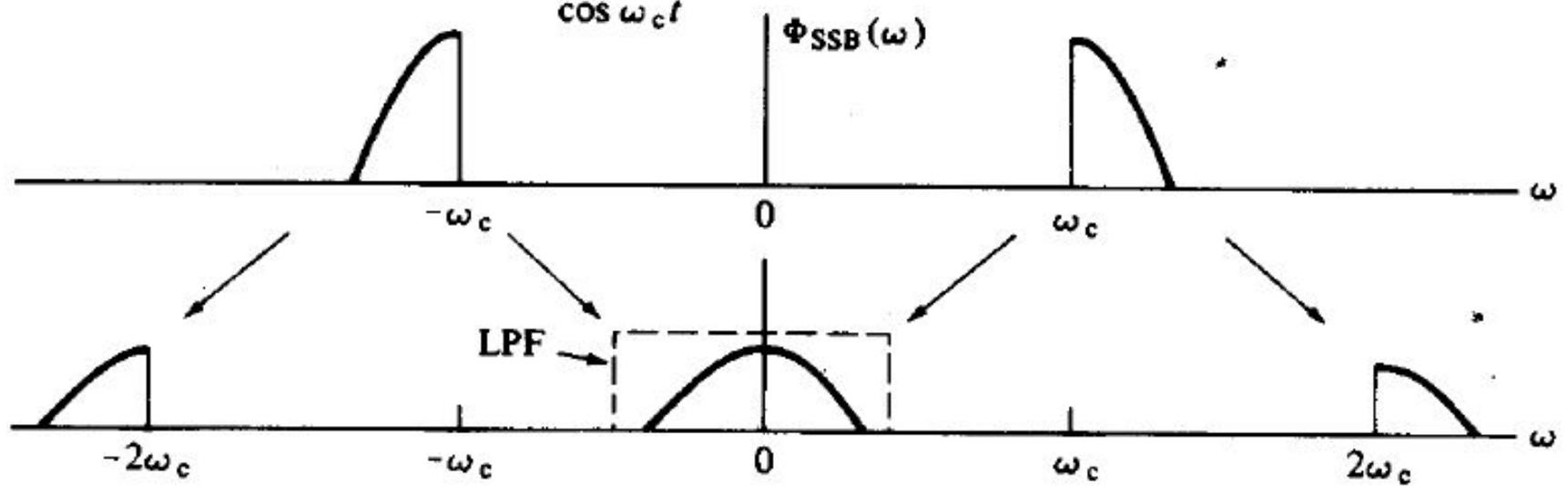
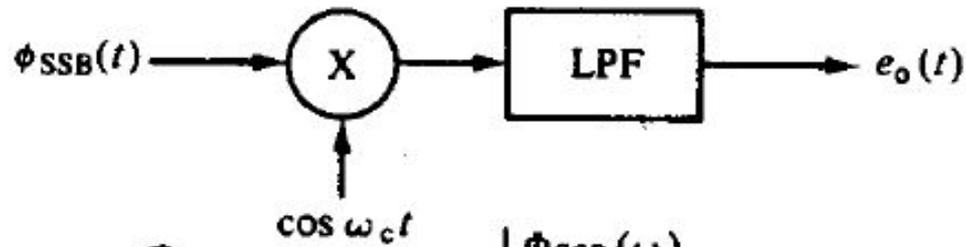
# Generación de señales SSB

- El principal inconveniente es el desfase de  $90^\circ$ , lo que restringe el ancho de banda





# Demodulación de señales SSB





## Dificultades de Modulación SSB

- Es difícil cuando el ancho de banda de la señal moduladora es amplio
- No pueden despreciarse las componentes de baja frecuencia

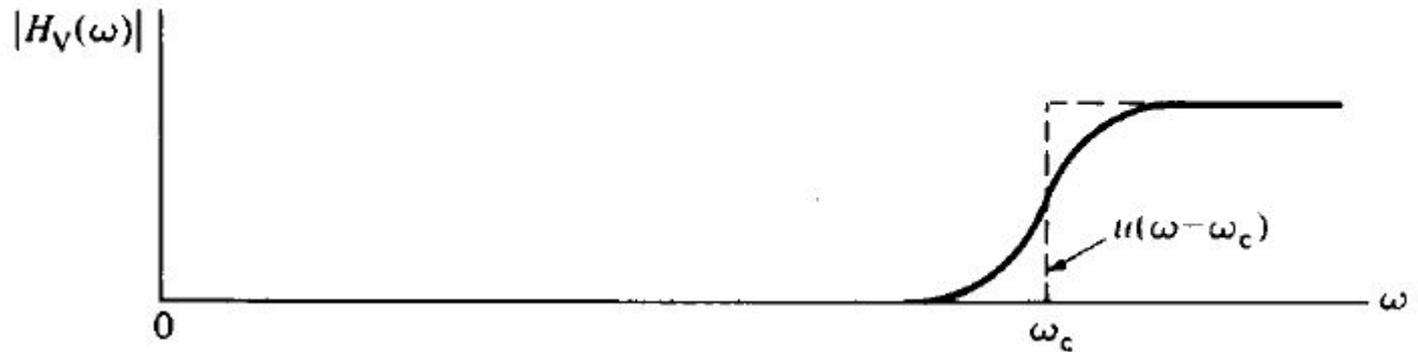


## Modulación en banda lateral residual (VSB)

- Se hace un compromiso entre DSB y SSB
- Se suprime parcialmente una banda lateral
- La densidad espectral es

$$\Phi_{\text{VSB}}(\omega) = \left[ \frac{1}{2}F(\omega - \omega_c) + \frac{1}{2}F(\omega + \omega_c) \right] H_V(\omega).$$

donde





## Modulación en banda lateral residual (VSB)

- Para la demodulación se puede utilizar detectores síncronos, si se transmite con portadora suprimida o detectores de envolvente de se transmite con gran portadora



# Relaciones Señal/Ruido en la recepción AM

- Pueden demostrarse las siguientes relaciones:

- Para DSB-SC

$$\frac{S_o}{N_o} = 2 \frac{S_i}{N_i}$$

mejora la relación  
señal/ruido

- Para DSB-LC

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{2 \overline{f^2(t)}}{A^2 + \overline{f^2(t)}} \frac{S_i}{N_i}$$

un poco más  
pobre

- Para SSB-SC

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{S_i}{N_i}$$

Es DSB-SC superior a  
SSB-SC?