

EL4005 Principios de Comunicaciones

Clase No.6: Otras Formas de Modulación de Amplitud



Patricio Parada

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile

27 de Agosto de 2010

Contenidos de la Clase (1)

Modulación de Amplitud con Eficiencia Espectral

Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM)

Modulación de Amplitud con Banda Lateral Única

VSB AM

Resumen y Lecturas

Motivación (1)

- Existen otras formas de modulación de amplitud que tiene aplicación en tecnologías actuales.
- Son formas más eficientes de modulación, en el sentido espectral.
- QAM: Quadrature Amplitude Modulation.
- SSB AM: Single Side Band AM
- VAM: Vestigial AM
- Receptor AM Superheterodino.

Motivación (2)

- PLL: Phase Locked Loop.

Modulación de Amplitud con Eficiencia Espectral (1)

- Tanto AM convencional como DSB-SC utilizan el doble del ancho de banda del mensaje $m(t)$.
- ¿Cómo podemos ser más eficientes?
 - Enviando dos señales a la vez (QAM).
 - Enviando sólo la banda lateral superior o la inferior (SSB).

Modulación de Amplitud en Cuadratura (1)

- QAM resuelve el problema de **eficiencia espectral** transmitiendo dos mensajes en forma simultánea.
- Se utiliza dos portadoras en la misma frecuencia, pero desfasadas en $\pi/2$.

$$u(t) = m_1(t) \cos(2\pi f_c t) + m_2(t) \sin(2\pi f_c t). \quad (1)$$

- ¿Cómo se puede recuperar los mensajes $m_1(t)$ y $m_2(t)$?

Modulación de Amplitud en Cuadratura (2)

- Separándolas en forma síncrona con las dos portadoras antes mencionadas:

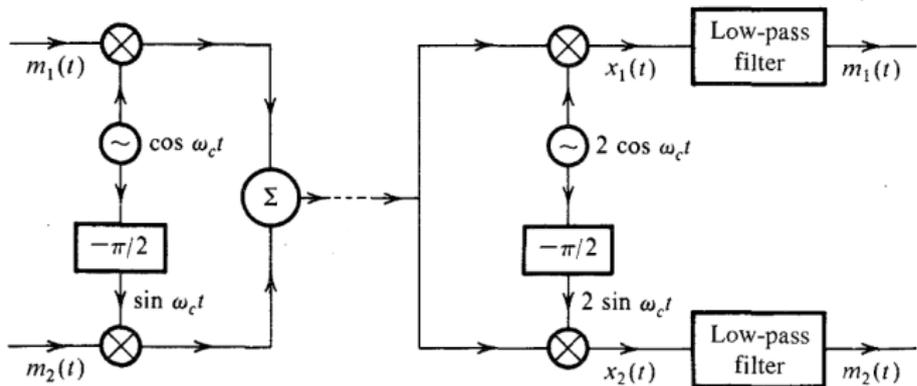
$$\begin{aligned}u(t) \cos(2\pi f_c t) &= m_1(t) \cos^2(2\pi f_c t) + m_2(t) \sin(2\pi f_c t) \cos(2\pi f_c t) \\ &= m_1(t) \left[\frac{1 + \cos(2\pi 2f_c t)}{2} \right] + m_2(t) \frac{\sin(2\pi 2f_c t)}{2} \\ &= \frac{m_1(t)}{2} + \frac{1}{2} \left[m_1(t) \cos(2\pi 2f_c t) + m_2(t) \sin(2\pi 2f_c t) \right]\end{aligned}$$

Modulación de Amplitud en Cuadratura (3)

- Similarmente,

$$\begin{aligned}u(t) \sin(2\pi f_c) &= m_1(t) \sin(2\pi f_c t) \cos(2\pi f_c t) + m_2(t) \sin^2(2\pi f_c t) \\&= m_1(t) \frac{\sin(2\pi 2f_c t)}{2} + m_2(t) \left[\frac{1 - \cos(2\pi 2f_c t)}{2} \right] \\&= \frac{1}{2} \left[m_1(t) \sin(2\pi 2f_c t) - m_2(t) \cos(2\pi 2f_c t) \right] + \frac{m_2(t)}{2}\end{aligned}$$

Modulación de Amplitud en Cuadratura (4)



- a.k.a. multiplexión en cuadratura.

Modulación de Amplitud en Cuadratura (5)

- El canal superior se denomina en fase (in-phase: I) y el inferior en cuadratura (quadrature: Q).

Modulación de Amplitud en Cuadratura (6)

- Notemos que si la demodulación es decoherente, esto es, existe una desfase no nulo entre la portadora utilizada para modular y demodular la señal, entonces:

$$\begin{aligned}u(t) \cos(2\pi f_c t + \theta) &= [m_1(t) \cos(2\pi f_c t) + m_2(t) \sin(2\pi f_c t)] \\ &\quad \times \cos(2\pi f_c t + \theta) \\ &= m_1(t) \cos(\theta) - m_2(t) \sin(\theta) \\ &\quad + \text{términos en pasabanda.}\end{aligned}$$

Modulación de Amplitud en Cuadratura (7)

- El mismo fenómeno se da en la señal de cuadratura.
- Interferencia intercanal (co-channel interference) es un fenómeno no deseable.
- Se debe resolver con algún mecanismo de adquisición de la portadora (PLL por ejemplo) o sincronización.
- QAM encuentra varios usos:
 - Se utiliza en TV analógica para enviar multiplexar la información de color (señales de crominancia).

Modulación de Amplitud en Cuadratura (8)

- Tiene una versión equivalente en modulación digital, y se usa en comunicaciones inalámbricas (2G en adelante).

Modulación de Amplitud con Banda Lateral Única (1)

- Esquemas DSB (con y sin portadora) utilizan un ancho de banda $B = 2W$ Hz.
- Existe redundancia entre las dos bandas laterales (superior e inferior).
- La transmisión de cualquiera de dichas bandas (superior ó inferior) es suficiente para la recuperación del mensaje.
- Reducción del ancho de banda de la señal transmitida W .

Modulación de Amplitud con Banda Lateral Única (2)

- Una señal SSB AM queda matemáticamente representada como sigue:

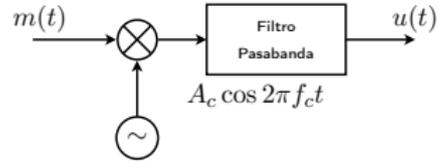
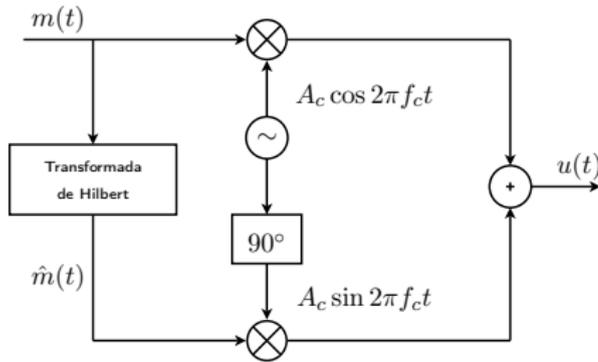
$$u(t) = A_c m(t) \cos(2\pi f_c t) \mp A_c \hat{m}(t) \sin(2\pi f_c t)$$

- $\hat{m}(\cdot)$ la transformada de Hilbert del mensaje $m(\cdot)$;
- el signo \mp determina la banda lateral obtenida (superior (USSB AM) o inferior(LSSB AM)).

Modulación de Amplitud con Banda Lateral Única (3)

- La transformada de Hilbert puede ser vista como un filtro lineal con respuesta en frecuencia $h(t) = \frac{1}{\pi t}$ (equivalentemente, respuesta en frecuencia $H(f) = -j$ si $f > 0$, $H(f) = j$ si $f < 0$, y $H(0) = 0$), la implementación de un modulador SSB AM es directa.
- Un modulador SSB AM puede ser implementado vía un modulador DSB-SC AM, seguido de un filtro pasabandas filtrando ya sea la banda lateral superior o inferior.

Modulación de Amplitud con Banda Lateral Única (4)



Modulación de Amplitud con Banda Lateral Única (5)

- **Implementación de este tipo de moduladores** (especialmente vía filtrado pasabandas) **es difícil en la práctica**
- En particular, cuando el mensaje $m(\cdot)$ tiene una gran cantidad de potencia concentrada en la vecindad de $f = 0$.
- El filtrado de la banda lateral superior o inferior debe tener una frecuencia de corte extremadamente marcada en la vecindad de la frecuencia portadora.
- Así puede “rechazar” fuertemente la banda lateral no deseada.

Demodulación de Señales SSB AM (1)

- La demodulación de señales SSB AM requiere, como en el caso de DSB-SC AM, de demoduladores síncronos (coherentes en fase).
- Asumimos recepción perfecta: $r(t) = u(t)$

$$\begin{aligned}r(t) \cos(2\pi f_c t + \phi) &= u(t) \cos(2\pi f_c t + \phi) \\ &= \frac{1}{2} A_c m(t) \cos(\phi) + \frac{1}{2} A_c \hat{m}(t) \sin(\phi) + \Theta(t),\end{aligned}$$

con $\Theta(t)$ conteniendo los términos respectivos en $\cos(4\pi f_c t + \phi)$ y $\sin(4\pi f_c t + \phi)$.

Demodulación de Señales SSB AM (2)

- Pasando la señal anterior por un filtro pasabajos ideal:

$$y_l(t) = \frac{1}{2}A_c m(t) \cos(\phi) + \frac{1}{2}A_c \hat{m}(t) \sin(\phi).$$

- Se repite el fenómeno visto en QAM: la fase ϕ no sólo reduce la amplitud de la señal mensaje demodulada, sino que también resulta en la presencia de la señal no deseada $\hat{m}(\cdot)$, contribuyendo a la distorsión de la señal así demodulada.

Demodulación de Señales SSB AM (3)

- Como antes, la transmisión de un tono “piloto” a la frecuencia portadora (f_c) resulta ser un método muy efectivo para la demodulación coherente (en fase) de la señal de interés $m(\cdot)$, eliminando la distorsión causada por la componente $\hat{m}(\cdot)$ ($\phi = 0$).
- Sin embargo, esto es realizado a costa de dedicar una porción de la potencia transmitida a la transmisión de la portadora extra de referencia.

Demodulación de Señales SSB AM (4)

- A pesar de lo anterior, la eficiencia espectral de SSB AM lo convierte en un método muy usado de modulación, especialmente en comunicaciones de voz sobre canales telefónicos (alámbricos e inalámbricos).
- En este tipo de aplicaciones telefónicas, un pulso piloto de referencia es transmitido para realizar la demodulación síncrona, el cual puede ser compartido entre varios canales.

VSB AM: AM de Banda Lateral Vestigial (1)

- Los fuertes requerimientos relativos al filtro pasabanda filtrando la banda lateral superior o inferior en SSB AM pueden ser “relajados” permitiendo la presencia de “vestigios” de la banda lateral no deseada a la salida del modulador SSB AM.
- \Rightarrow Simplificación del diseño del filtro de banda lateral
- El costo es un pequeño incremento en el ancho de banda del canal necesario para transmitir la señal.

VSB AM: AM de Banda Lateral Vestigial (2)

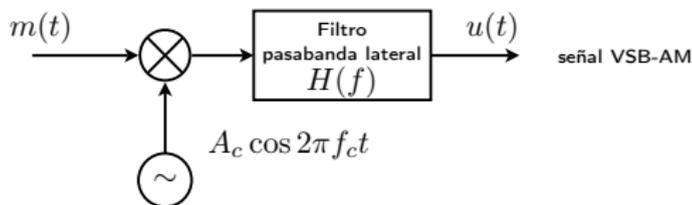
- La señal resultante es así llamada **AM de Banda Lateral Vestigial**.
- Modulación es apropiada para señales con un fuerte contenido de componentes de baja frecuencia, tales como señales de video.
- Utilizado en transmisión analógica de televisión.

Generación de la Señal VSB AM (1)

- Para generar una señal VSB AM, comenzamos generando una señal DSB-SC AM para luego pasarla a través de un filtro de banda lateral con respuesta en frecuencia

$$H(f) = \mathcal{F}[h(t)]. \quad (2)$$

Generación de la Señal VSB AM (2)



- En el dominio del tiempo, la señal VSB AM $u(\cdot)$:

$$u(t) = [A_c m(t) \cos(2\pi f_c t)] * h(t)$$

con $m(\cdot)$ la señal mensaje.

Generación de la Señal VSB AM (3)

- En el dominio de la frecuencia, la expresión correspondiente es entonces:

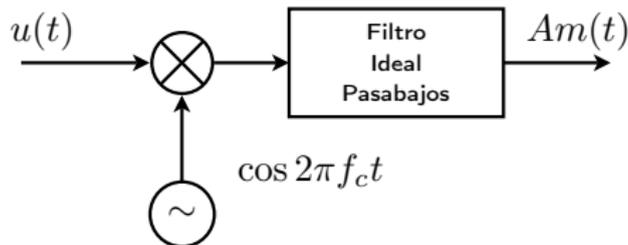
$$U(f) = \frac{A_c}{2} [M(f - f_c) + M(f + f_c)] H(f)$$

con $M(f) = \mathcal{F}[m(t)]$.

- Para determinar las características de $H(f)$, consideramos el proceso de demodulación de la señal VSB AM $u(\cdot)$.

Generación de la Señal VSB AM (4)

- Multiplicamos la señal $u(t)$ por la componente portadora $\cos(2\pi f_c t)$ y luego pasamos el resultado por un filtro ideal pasabajos:



Generación de la Señal VSB AM (5)

- La señal producto $v(\cdot)$ es:

$$v(t) = u(t) \cos(2\pi f_c t).$$

- Equivalentemente, en el dominio de la frecuencia:

$$V(f) = \frac{1}{2} [U(f - f_c) + U(f + f_c)].$$

Generación de la Señal VSB AM (6)

- Reemplazando para $U(\cdot)$ encontramos:

$$V(f) = \frac{A_c}{4} [M(f - 2f_c) + M(f)] H(f - f_c) \\ + \frac{A_c}{4} [M(f) + M(f + 2f_c)] H(f + f_c).$$

- El filtro pasabajos rechaza las componentes de doble frecuencia ($\pm 2f_c$), dejando pasar sólo las componentes en el rango $|f| \leq W$.

Generación de la Señal VSB AM (7)

- La señal a la salida del filtro, $v_l(\cdot)$, tiene entonces espectro $V_l(\cdot)$ dado por:

$$V_l(f) = \frac{A_c}{4} M(f) [H(f - f_c) + H(f + f_c)].$$

Generación de la Señal VSB AM (8)

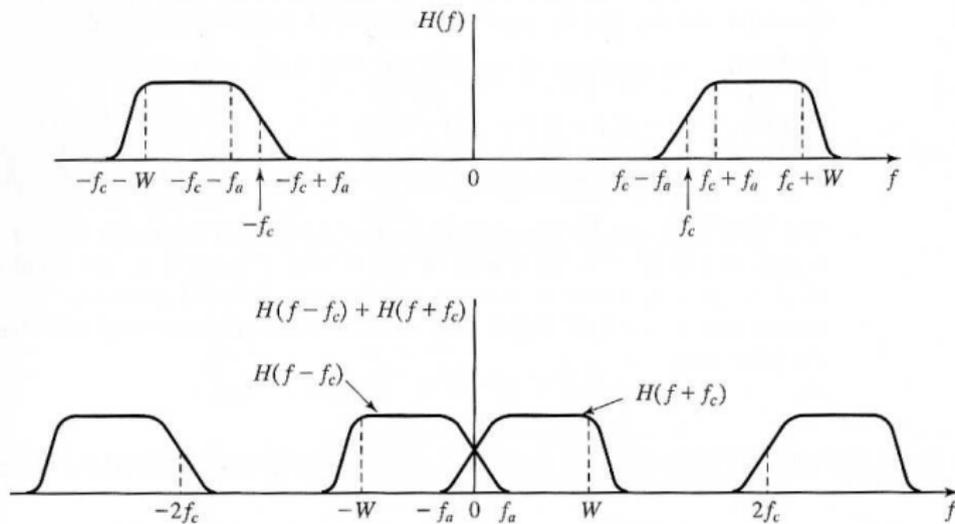
- Por lo tanto, si deseamos la demodulación de $m(\cdot)$ sin distorsión, requerimos que:

$$H(f - f_c) + H(f + f_c) = \text{constante}$$

para $|f| \leq W$.

- La condición anterior es satisfecha por filtros con respuesta en frecuencia $H(\cdot)$ de la forma:

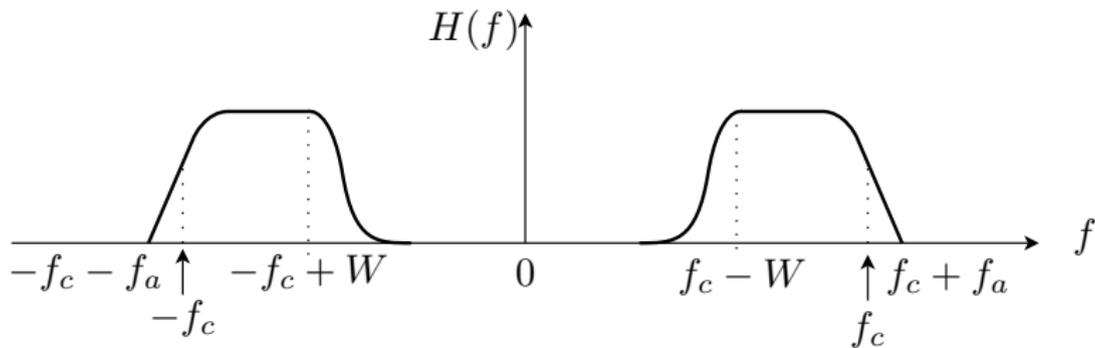
Generación de la Señal VSB AM (9)



Generación de la Señal VSB AM (10)

- Notar que $H(\cdot)$ selecciona la banda lateral superior y un “vestigio” de la banda lateral inferior.
- Posee además simetría impar alrededor de la frecuencia portadora f_c en un rango de frecuencias $f_c - f_a < f < f_c + f_a$, con f_a una frecuencia una frecuencia convenientemente elegida de tal forma de corresponder a una pequeña fracción de f_c , i.e., $f_a \ll W$.
- Alternativamente, en la figura se observa un filtro con respuesta en frecuencia $H(\cdot)$ seleccionando la banda lateral inferior y un “vestigio” de la superior.

Generación de la Señal VSB AM (11)



Resumen

- Estudiamos 3 formas de hacer mejor uso del espectro.
- QAM: dos por uno.
- SSB: uno por uno. Problema con señales con fuerte contenido DC.
- AM Vestigial: uno + δ por uno. Solución de compromiso.

Lecturas

- Salehi & Proakis, *Communication Systems Engineering*, Capítulo 3, secciones 3.2.3 y 3.2.4.