

Cap. 6.3.-Requerimientos del ancho de banda para las ondas, con modulación angular

En 1922, J. R. Carson comprobó matemáticamente que para una frecuencia de señal modulante dada, una onda de modulación en frecuencia, no puede acomodarse en un ancho de banda más angosto que una onda de modulación en amplitud. Del análisis anterior y en el ejemplo 6-2, puede observarse que el ancho de banda de una onda de modulación angular es una función de la frecuencia de la señal modulante e índice de modulación. Con la modulación angular, se producen varios conjuntos de bandas laterales y, consecuentemente, el ancho de banda puede ser de manera significativa más ancho que el de una onda de modulación en amplitud con la misma señal modulante. La forma de onda de salida del modulador en el ejemplo 6-2 requiere 6 KHz. de ancho de banda para pasar la portadora y todas las frecuencias laterales importantes. Un modulador de doble banda lateral de AM convencional requiere de sólo 2 KHz. de ancho de banda, y un sistema de banda lateral única, de sólo 1 KHz.

Las formas de ondas de modulación angular se clasifican generalmente como de *índice bajo*, *mediano* o *alto*. Para el caso del índice bajo, la desviación de fase pico (índice de modulación), es menor que 1 rad, y el caso de índice alto ocurre cuando la desviación de fase pico es mayor que 10 rad. Los índices de modulación, mayores de 1 y menores que 10, se clasifican como un índice mediano. De la tabla 6-2 puede observarse que con la modulación angular de índice bajo la mayoría de la información de la señal se cargará por el primer conjunto de bandas laterales, y el mínimo de ancho de banda requerido es aproximadamente, igual al doble de la frecuencia de la señal modulante más alta. Por esta razón, los sistemas de FM de índice bajo a veces se llaman *banda angosta de FM* Para una señal de índice alto, se puede utilizar un método para determinar el ancho de banda llamado *cuasi-estacionario*. Con este método, se asume que la señal modulante está cambiando lentamente. Por ejemplo, para un modulador de FM con una sensibilidad de desviación $K_f = 2 \text{ kHz/V}$ y una señal modulante 1 Vp, la desviación de frecuencia pico $\Delta f = 2000 \text{ Hz}$.

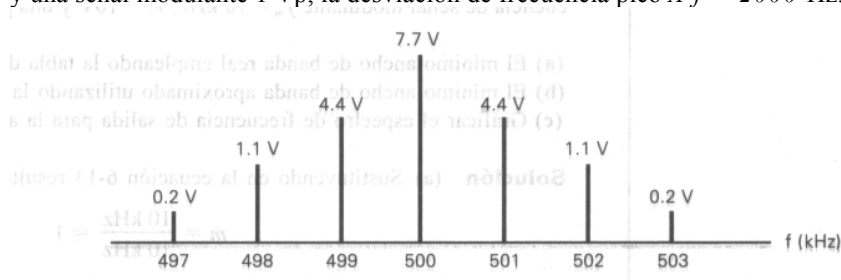


Figura 6-6 Espectro de la señal según la frecuencia

Si la frecuencia de la señal modulante es muy lenta, el ancho de banda se determina por la desviación de la frecuencia pico-a-pico. Por lo tanto, para los índices de modulación más grandes, el mínimo ancho de banda requerido, para propagar una onda de modulación en frecuencia es aproximadamente igual a la desviación de la frecuencia pico-a-pico ($2\Delta f$)

Por lo tanto, para la modulación de índice muy pequeño, el espectro de frecuencia es semejante a la doble banda lateral de AM y el mínimo ancho de banda es aproximado de la siguiente manera

$$B = 2fm \text{ (hertz)} \quad (6-18)$$

y para la modulación de índice alto, el mínimo de ancho de banda se aproxima de la siguiente manera

$$B = 2\Delta f \text{ (hertz)} \quad (6-19)$$

El ancho de banda real requerido, para pasar todas las bandas laterales importantes, para una onda de modulación angular, es igual a dos veces el producto de la frecuencia de la señal modulante más alta y el número de bandas laterales importantes determinado por las funciones de la tabla de Bessel. Matemáticamente, la regla para determinar el mínimo ancho de banda para una onda de modulación angular utilizando la tabla Bessel es

$$B = 2(n \times fm) \text{ (hertz)} \quad (6-20)$$

en donde $n = \text{número de bandas laterales significativas}$
 $fm = \text{frecuencia de la señal modulante (hertz)}$

En un memorando no publicado, con fecha 28 de agosto de 1939, Carson estableció una regla general, para calcular aproximadamente el ancho de banda, para los sistemas de modulación angular, sin importar el índice de modulación. Esta se llama la *regla de Carson*. Simplemente dicho, la regla de Carson aproxima el ancho de banda de una onda de modulación angular como el doble de la suma de la desviación de frecuencia pico y la máxima frecuencia de la señal modulante. Matemáticamente dicha, la regla de Carson es

$$B = 2[\Delta f + f_{m(m\acute{a}x)}] \text{ (hertz)} \quad (6-21)$$

en donde $\Delta f = \text{m\acute{a}xima desviaci\acute{o}n de frecuencia (hertz)}$

$f_{m(m\acute{a}x)} = \text{frecuencia m\acute{a}s alta modulante de la se\~{n}al (hertz)}$

La regla de Carson es una aproximaci3n y proporciona anchos de banda de transmisiones que son un poco m\`as angostos que los anchos de banda determinados utilizando la tabla de Bessel y la ecuaci3n 6-20. La regla de Carson define un ancho de banda que incluye aproximadamente el 98% de la potencia total en la onda modulada. El ancho de banda real necesario es una funci3n de la forma de onda de la se\~{n}al modulante y la calidad de la transmisi3n deseada.

EJEMPLO 6-3

Para un modulador de FM con una desviaci3n de frecuencia pico $\Delta f = 10 \text{ kHz}$, una frecuencia de se\~{n}al modulante $f_m = 10 \text{ kHz}$, $V_c = 10V$ y una portadora de 500 kHz , determine:

- (a) *El m\`ınimo ancho de banda real empleando la tabla de funci3n Bessel.*
- (b) *El m\`ınimo ancho de banda aproximado utilizando la regla de Carson.*
- (c) *Graficar el espectro de frecuencia de salida para la aproximaci3n de Bessel.*

Soluci3n (a) *Sustituyendo en la ecuaci3n 6-13 resulta*

$$m = \frac{10\text{kHz}}{10\text{kHz}} = 1$$

De la tabla 6-2, un \`ındice de modulasi3n de 1 rinde tres conjuntos de bandas laterales significativas. Sustituyendo en la ecuaci3n 6-20, el ancho de banda es

$$B = 2(3 \times 10 \text{ kHz}) = \mathbf{60 \text{ kHz}}$$

(b) *Substituyendo en la ecuaci3n 6-21, el m\`ınimo ancho de banda es*

$$B = 2(10 \text{ kHz} \times 10 \text{ kHz}) = 40 \text{ kHz}$$

(c) *El espectro de frecuencia de salida para la aproximaci3n de Bessel se muestra en la figura 6-7.*

En el ejemplo 6-3 puede verse que existe una diferencia importante, en el m\`ınimo ancho de banda, determinada por la regla de Carson y el m\`ınimo ancho de banda, determinado de la tabla de Bessel. El ancho de banda de la regla de Carson es menor que el m\`ınimo ancho de banda requerido para pasar a todos los conjuntos de bandas laterales significativas como est\`a definido por la tabla de Bessel. Por lo tanto, un sistema que se dise\~{n}o usando la regla de Carson tendr\`ıa un ancho de banda m\`as angosto y, por lo tanto, el rendimiento es m\`as pobre que el de un sistema dise\~{n}ado usando la tabla de Bessel. Para los \`ındices de modulasi3n superiores a 5, la regla de Carson es una aproximaci3n cercana al verdadero ancho de banda real requerido.

Relación de desviación.

Para un sistema de FM predeterminado, el mínimo ancho de banda es el más grande, cuando se obtiene la máxima desviación de frecuencia con la máxima frecuencia de la señal modulante (es decir, la modulación en frecuencia más alta ocurre con la máxima amplitud permitida) Por definición, la relación de desviación (DR), es el índice de modulación del peor caso y es igual a la máxima desviación de frecuencia dividida por la máxima frecuencia de la señal modulante. El índice de modulación del peor caso produce el espectro de frecuencia de salida más ancho. Matemáticamente, la relación de desviación es

$$DR = \frac{\Delta f_{(max)}}{f_{m(max)}} \quad (6-22)$$

en donde

DR = relación de desviación (sin unidad)

$\Delta f_{(máx)}$ = máxima desviación de frecuencia (hertz)

$f_{m(máx)}$ = máxima frecuencia de la señal modulante (hertz)

Por ejemplo, para la porción de sonido de una estación de banda de radiodifusión de TV comercial, la máxima desviación de frecuencia, establecida por la CNC, es 50 kHz y la máxima frecuencia de la señal modulante es 15 kHz. Por lo tanto, la relación de desviación, para una estación de radiodifusión de televisión es

$$DR = \frac{50kHz}{15kHz} = 3,33$$

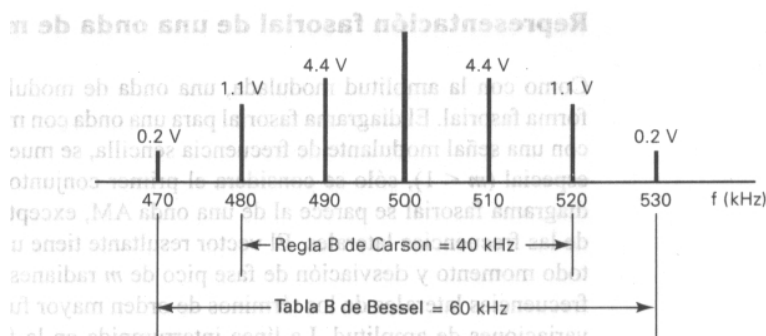


Figura 6-7 Espectro de frecuencia para el ejemplo 6-3

Esto no significa que cuando un índice de modulación de 3.33 ocurre, también ocurre el ancho de banda más grande, al mismo tiempo. Significa que cuando un índice de modulación de 3.33 ocurre para un máximo de frecuencia de la señal modulante, ocurre el ancho de banda más grande.

EJEMPLO 6-4

- Determine la relación de desviación y ancho de banda para el índice de modulación del peor caso (ancho de banda más grande) para un transmisor de banda de radiodifusión de FM con una desviación de frecuencia pico de 75 kHz y una máxima frecuencia de señal modulante de 15 kHz.
- Determine la relación de desviación y máximo ancho de banda para el índice de modulación igual, con sólo la mitad de la desviación de frecuencia pico y frecuencia de señal modulante.

Solución (a) La relación de desviación se encuentra sustituyendo en la ecuación 6-22.

$$DR = \frac{75kHz}{15kHz} = 5$$

De la tabla 6-2, un índice de modulación de 5 produce ocho bandas laterales significativas. Sustituyendo en la ecuación 6-20 resulta en

$$B = 2(8 \times 15,000) = 240 \text{ kHz}$$

(b) Para una desviación de frecuencia de 37.5 kHz y una frecuencia de señal modulante $f_m = 7.5 \text{ kHz}$, el índice de modulación es

$$m = \frac{37,5\text{kHz}}{7,5\text{kHz}} = 5$$

y el ancho de banda es

$$B = 2(8 \times 7500) = 120 \text{ kHz}$$

Del ejemplo 6-4 puede observarse que, aunque se logra el mismo índice de modulación (5), con dos diferentes frecuencias y amplitudes de la señal modulante, se produjeron dos diferentes anchos de banda. Un número infinito de combinaciones de la frecuencia de la señal de modulación y desviación de frecuencia producirán un índice de modulación de 5.

Sin embargo, el caso producido de la máxima frecuencia de la señal modulante y máxima desviación de frecuencia, siempre producirá el ancho de banda más grande.

Al principio podría parecer que un índice de modulación más alto, con una señal modulante más baja, generaría un ancho de banda mayor porque se producen más conjuntos de bandas laterales, pero recuerde que las bandas laterales estarían más cerca una de otra. Por ejemplo, una señal modulante de 1 kHz, que produce 10 kHz de desviación de frecuencia, tiene un índice de modulación de $m = 10$, y produce 14 conjuntos significativos de bandas laterales. Sin embargo, las bandas laterales están sólo desplazadas, una de otra, por 1 kHz y, por lo tanto, el total del ancho de banda es solo de 28.000 Hz [$2(14 \times 1000)$]

Representación fasorial de una onda de modulación angular

Como con la amplitud modulada, una onda de modulación angular puede mostrarse en forma fasorial. El diagrama fasorial para una onda con modulación angular, con índice bajo, con una señal modulante de frecuencia única, se muestra en la figura 6-8. Para este caso especial ($m < 1$), sólo se considera el primer conjunto de pares de bandas laterales, y el diagrama fasorial se parece al de una onda AM, excepto por una inversión de fase de una de las frecuencias laterales. El vector resultante tiene una amplitud cercana a la unidad en todo momento y desviación de fase pico de m radianes. Es importante observar que si las frecuencias laterales de los términos de orden mayor fuesen incluidas, el vector no tendría variaciones de amplitud. La línea interrumpida en la figura 6-8e, es el lugar geométrico resultante formado por la portadora y el primer conjunto de frecuencias laterales.

La figura 6-9 muestra el diagrama fasorial para una onda de modulación angular de índice alto, con cinco conjuntos de frecuencias laterales (para mayor sencillez, se muestran sólo los vectores para los primeros dos conjuntos) El vector resultante es la suma de la componente de la portadora y los componentes de las frecuencias laterales significativas, con sus magnitudes ajustadas de acuerdo a la tabla de Bessel. Cada frecuencia lateral se cambia de posición 90° adicionales a la frecuencia lateral anterior. El lugar geométrico de la aproximación resultante de los cinco componentes está en curva y sigue de manera cercana al lugar geométrico de la señal. Por definición, el lugar geométrico es un segmento circular, con un radio igual a la amplitud de la portadora no modulada. Debe observarse que la amplitud de la señal resultante y, consecuentemente, la potencia de la señal, permanecen constantes.

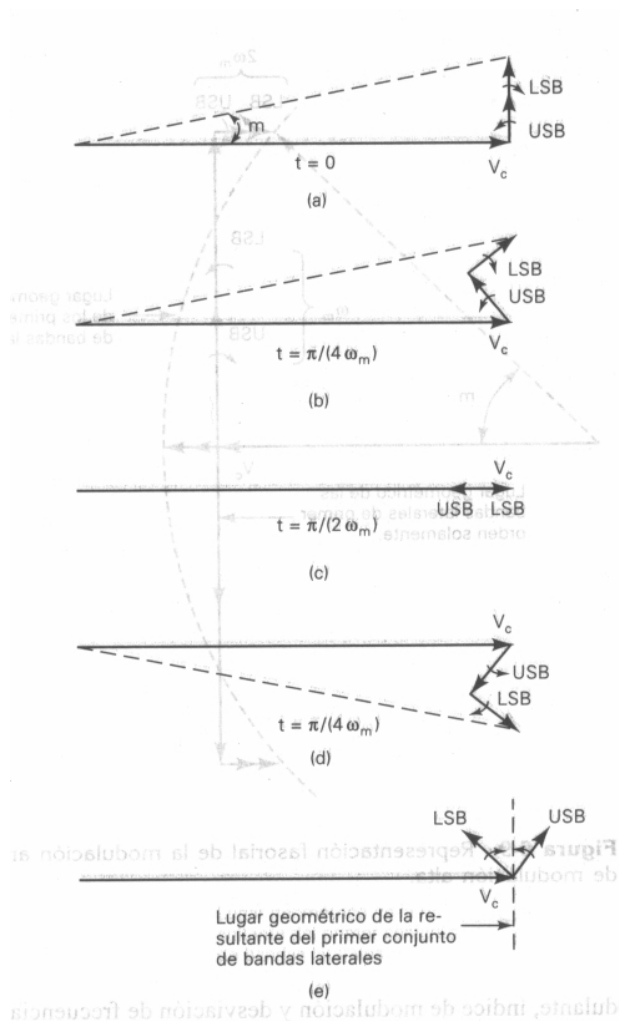


Figura 6.8 Diagrama fasorial

Potencia promedio de una onda de modulación angular

Una de las diferencias más importantes entre la modulación angular y la modulación en amplitud, es la distribución de potencia en la onda modulada. A diferencia de AM, la potencia total en una onda de modulación angular es igual a la potencia de la portadora no modulada (es decir, las bandas laterales no agregan potencia a la señal modulada compuesta). Por lo tanto, con la modulación angular, la potencia que estaba originalmente en la portadora sin modular es redistribuida entre el conducto y sus bandas laterales. La potencia promedio de una onda de modulación angular es independiente de la señal modulante, índice de modulación y desviación de frecuencia. Es igual a la potencia promedio de la portadora no modulada, sin importar la profundidad de la modulación. Matemáticamente, la potencia promedio de la portadora no modulada es

$$P_c = \frac{V_c^2}{2R} \text{ watts} \quad (6-23)$$

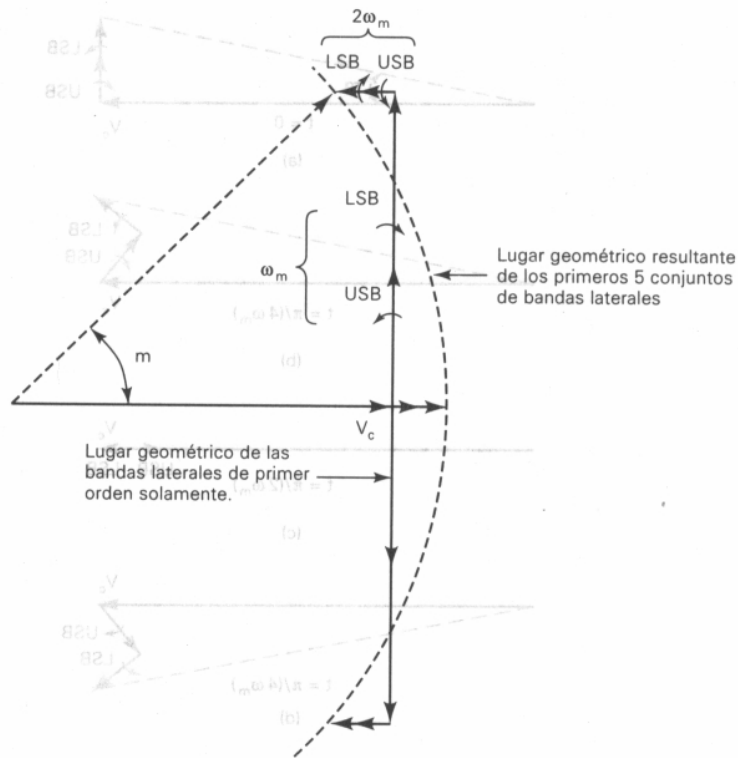


Figura 6.9. Lugar geométrico de las bandas laterales

en donde P_c = potencia de la portadora (watts)
 V_c = voltaje pico de la portadora no modulada (volts)
 R = resistencia de carga (ohms)

La potencia total instantánea en una portadora de modulación angular es

$$p_t = \frac{m(t)^2}{R} \text{ watts} \quad (6-24a)$$

Al sustituir para $m(t)$ resulta en

$$p_t = \frac{V_c^2}{R} \cos^2[\omega_c t + \theta(t)] \quad (6-24b)$$

y expandiendo dará como resultado

$$p_t = \frac{V_c^2}{R} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos[2\omega_c t + 2\theta(t)] \right\} \quad (6-24c)$$

En la ecuación 6-24c, el segundo término consiste de un número infinito de componentes, de frecuencia lateral sinusoidal, sobre una frecuencia igual al doble de la frecuencia de la portadora ($2\omega_c$). Consecuentemente, el valor promedio del segundo término es cero, y la potencia promedio de la onda con modulación se reduce a

$$P_t = \frac{V_c^2}{2R} \text{ watts} \quad (6-25)$$

Observe que las ecuaciones 6-23 y 6-25 son idénticas, así que la potencia promedio de la portadora modulada debe ser igual a la potencia promedio de la portadora no modulada.

La potencia de la portadora modulada es la suma de las potencias de las portadoras y los componentes de frecuencias laterales. Por lo tanto, el total de la potencia de la onda modulada es

$$P_t = P_c + P_1 + P_2 + P_3 + P_n \quad (6-26)$$

$$P_t = \frac{V_c^2}{2R} + \frac{2(V_1^2)}{2R} + \frac{2(V_2^2)}{2R} + \frac{2(V_3^2)}{2R} + \frac{2(V_n^2)}{2R} \quad (6-27)$$

En donde

- P_1 = potencia en el primer conjunto de bandas laterales
- P_c = potencia de la portadora
- P_2 = potencia en el segundo conjunto de bandas laterales
- P_3 = potencia en el tercer conjunto de bandas laterales
- P_n = potencia en el conjunto enésimo de bandas laterales

EJEMPLO 6-5

(a) Determine la potencia de la portadora no modulada para el modulador de FM y las condiciones proporcionadas en el ejemplo 6-2 (asuma una resistencia de carga $R_L = 50 \Omega$).

(b) Determine la potencia total de la onda de modulación angular.

Solución (a) Sustituyendo en la ecuación 6-22 resulta en

$$P_c = \frac{10^2}{2(50)} = 1W$$

(b) Sustituyendo en la ecuación 6-27 nos da

$$P_c = \frac{7,7^2 + 2(4,4)^2 + 2(1,1)^2 + 2(0,2)^2}{2(50)} = 1,0051W$$

Los resultados de (a) y (b) no son exactamente iguales porque los valores proporcionados en la tabla de Bessel han sido redondeados. Sin embargo, los resultados son lo suficientemente cercanos para ilustrar que la potencia en la onda modulada y la portadora no modulada son iguales.

Modulación angular y ruido

Cuando el ruido térmico con una densidad espectral constante se agrega a una señal de FM, se produce una desviación de frecuencia no deseada de la portadora. La magnitud de esta desviación de frecuencia no deseada depende de la amplitud relativa del ruido con respecto a la portadora. Cuando esta desviación de la portadora no deseada es demodulada, se convierte en ruido si tiene los componentes de frecuencia que caen dentro del espectro de información-frecuencia. La forma espectral del ruido demodulado depende si se usó un demodulador FM o PM. El voltaje de ruido de la salida de un demodulador de PM es constante con la frecuencia, mientras que el voltaje de ruido en la salida de un demodulador de FM se incrementa en forma lineal con la frecuencia. Esto es comúnmente llamado el *triángulo de ruido de FM* y se ilustra en la figura 6-10. Puede

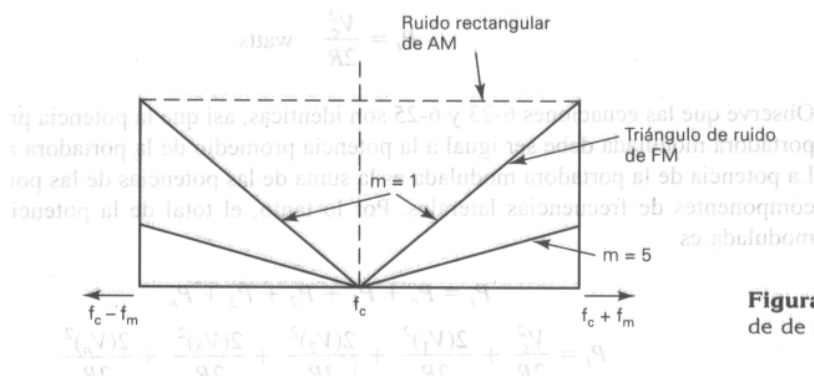


Figura 6-10 Triángulo de ruido de de FM.

observarse que el voltaje de ruido demodulado es inherentemente mayor para las frecuencias de señal modulante más altas.

Modulación de fase debido a una senoide interferente.

La figura 6-11 muestra la modulación en fase causada por una señal de ruido de frecuencia única. La componente de ruido V_n se separa en frecuencia de la componente de la señal V_c por frecuencia f_n . Esto se muestra en la figura 6-11b. Asumiendo que $V_c > V_n$, la desviación pico de fase debido a una senoide de frecuencia única interferente ocurre cuando los voltajes de la señal y ruido están en cuadratura y se aproxima a los ángulos pequeños como

$$\Delta\theta(\text{pico}) \cong \frac{V_n}{V_c} \text{rad} \quad (6-28)$$

La figura 6-11c muestra el efecto de *limitar* la amplitud de la señal de FM compuesta sobre el ruido. (Limitar es comúnmente usado en los receptores de modulación angular y se explica más adelante en el curso) Puede observarse que la señal de ruido, de frecuencia única, fue transportada a un par de bandas laterales de ruido, con una amplitud de $V_n/2$. Estas bandas laterales son coherentes; por lo tanto, la desviación de fase pico aún es V_n/V_c radianes. Sin embargo, las variaciones de amplitud no deseadas han sido eliminadas, lo cual reduce la potencia total, pero no reduce la interferencia en la señal demodulada debida a la desviación de fase no deseada.

Modulación de frecuencia debida a una senoide interferente

De la ecuación 6-6a, la desviación de frecuencia instantánea $\Delta f(t)$ es la primera derivada en el tiempo, de la desviación de fase instantánea $\theta(t)$. Cuando la componente de la portadora es mucho más grande que el voltaje de ruido interferente, la desviación de fase instantánea es aproximadamente

$$\theta(t) = \frac{V_n}{V_c} = \text{sen}(\omega_n t + \theta_n) \text{radianes} \quad (6-29)$$

y, tomando la primera derivada, se obtiene

$$\Delta\omega(t) = \frac{V_n}{V_c} = \omega_n \cos(\omega_n t + \theta_n) \text{radianes/seg} \quad (6-30)$$

Por lo tanto, la desviación de frecuencia pico es [para $\cos(\omega_n t + \theta_n) = 1$]

$$\Delta\omega_{pico} = \frac{V_n}{V_c} = \omega_n \text{radianes/seg} = f_n \text{hertz} \quad (6-31 \text{ y } 6-32)$$

Arreglando la ecuación 6-13, puede observarse que la desviación de frecuencia pico (Δf) es una función de la frecuencia de la señal modulante y el índice de modulación. Por lo tanto, para una modulación en frecuencia de ruido f_n , la desviación de frecuencia pico es

$$\Delta f_{pico} = m f_n \text{ Hz} \quad (6-33)$$

en donde $m =$ índice de modulación ($m < 1$).

De la ecuación 6-33, puede observarse que mientras más lejos esté desplazada la frecuencia del ruido de la frecuencia de la portadora, mayor es la desviación de la frecuencia. Por lo tanto, las frecuencias de ruido que producen componentes en el lado alto del espectro de frecuencia de la señal de modulación, producen más desviación de frecuencia para la misma desviación de fase que las frecuencias que caen en el lado inferior. Los demoduladores de FM generan un voltaje de salida que es proporcional a la desviación de frecuencia e igual a la diferencia entre la frecuencia de la portadora y la frecuencia de la señal interferente. Por lo tanto, los componentes de ruido, de frecuencia alta, producen más ruido demodulado que los componentes de frecuencia baja.

La relación de señal-a-ruido a la salida de un demodulador de FM, debida a la desviación de frecuencia no deseada de una sinusoide interferente es la relación de la desviación de frecuencia pico debida a la señal de información con la desviación de frecuencia pico debida a la señal interferente.

$$\frac{S}{N} = \frac{\Delta f_{debida \text{ a la señal}}}{\Delta f_{debida \text{ al ruido}}} \quad (6-34)$$

EJEMPLO 6-6

Para una portadora de modulación angular $V_c = 6 \cos(2\pi 110 \text{ MHz } t)$ con 75 kHz de desviación de frecuencia debido a la señal de información y señal de interferencia de frecuencia única $V_n = 0.3 \cos(2\pi 109.985 \text{ MHz } t)$ determine:

- (a) La frecuencia de la señal de interferencia demodulada.
 (b) Desviación de fase y de frecuencia pico debida a la señal de interferencia. (c) Relación de señal-a-ruido de voltaje a la salida del demodulador.

Solución (a) La frecuencia de la interferencia de ruido es la diferencia entre la frecuencia de la portadora y la frecuencia de la señal de interferencia de frecuencia única.

$$f_c - f_n = 110 \text{ MHz} - 109.985 \text{ MHz} = 15 \text{ kHz}$$

(b) Substituyendo en la ecuación 6-28 resulta en

$$\Delta\theta_{pico} = 0,3/6 = 0.05 \text{ rad}$$

Substituyendo en la ecuación 6-32 nos da

$$\Delta f_{pico} = \frac{0,3 \times 15 \text{ kHz}}{6} = 750 \text{ Hz}$$

(c) La relación S/N de voltaje debido al tono interferente es la relación de la amplitud de la portadora con la amplitud de la señal interferente, o

$$6/0,3 = 20$$

La relación S/N de voltaje después de la demodulación se encuentra substituyendo en la ecuación 6-34:

$$\frac{S}{N} = \frac{75kHz}{750Hz} = 100$$

Por lo tanto, existe una mejora señal-a-ruido de voltaje de $100/20 = 5$ ó $20 \log 5 = 14 \text{ dB}$.

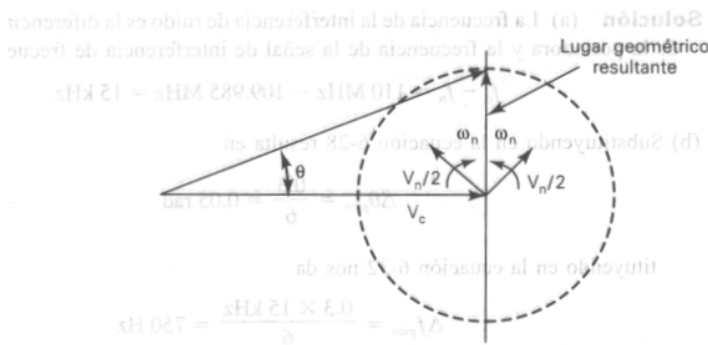
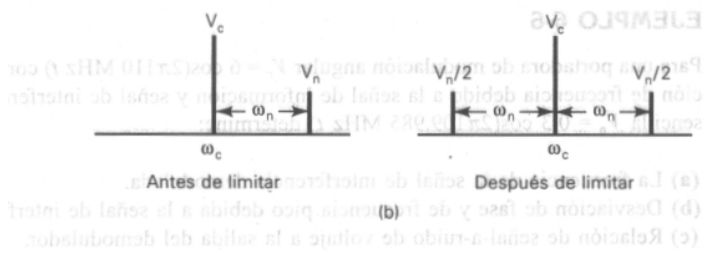
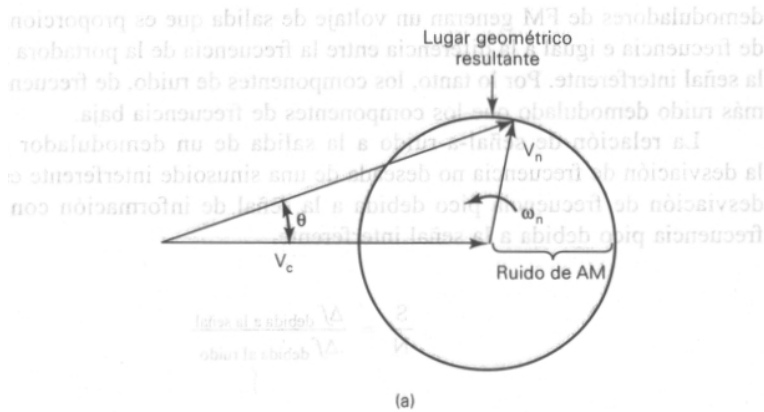


Figura 6-11 Sinusoide interferente de ruido: (a) antes de limitar; (b) espectro de frecuencia; (c) después de limitar

Preénfasis y Deénfasis

El triángulo de ruido, mostrado en la figura 6-10, muestra que, con FM, existe una distribución uniforme de ruido. El ruido en las frecuencias de la señal modulante superiores, es inherentemente mayor en amplitud que el ruido en las fre-

cuencias inferiores. Esto incluye la interferencia de frecuencia única y el ruido térmico. Por lo tanto, para las señales de información con un nivel de señal uniforme, se produce una relación señal-a-ruido no uniforme y las frecuencias de la señal modulante mayores tienen una relación señal-a-ruido más bajo que las frecuencias inferiores. Esto se muestra en la figura 6-12a. Puede observarse que la relación S/N es más baja en las orillas de la alta frecuencia del triángulo. Para compensar todo esto, las señales modulantes de alta frecuencia son enfatizadas o aumentadas en amplitud, en el transmisor, antes de realizar la modulación.

Para compensar este aumento, las señales de alta frecuencia son atenuadas o desenfatisadas en el receptor después de que se ha realizado la demodulación. Deénfasis es el recíproco de preénfasis, y, por lo tanto una red de deénfasis restaura las características originales de amplitud-vs-frecuencia a las señales de información.

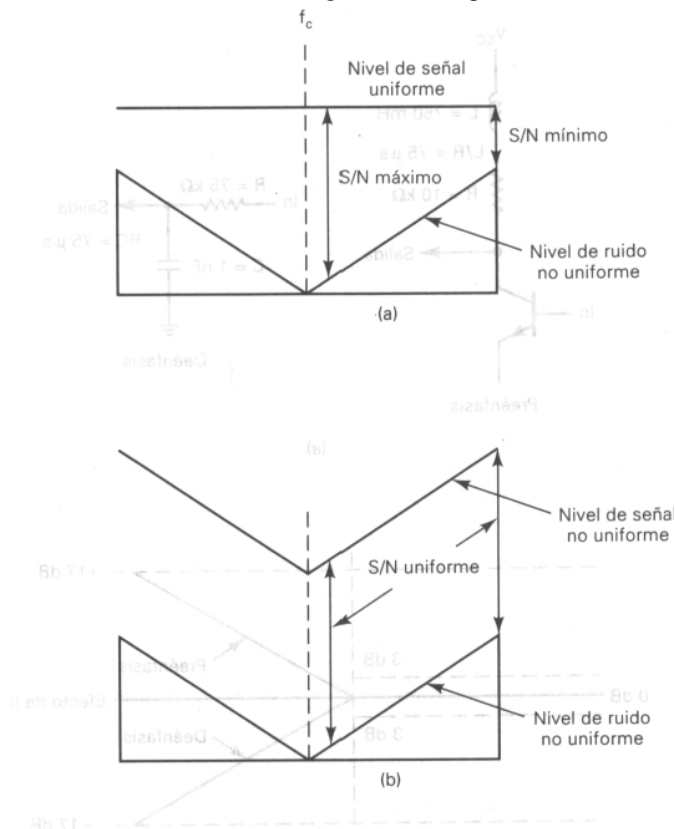


Figura 6-12 Señal a ruido de FM: (a) sin preénfasis; (b) con preénfasis

Esencialmente, la red de preénfasis permite que las señales modulantes de alta frecuencia modulen la portadora a un nivel más alto y, por lo tanto, causen más desviación de frecuencia que la que sus amplitudes originales hubiesen producido. Las señales de alta frecuencia se propagan por el sistema a un nivel elevado (desviación de frecuencia incrementada), demoduladas y, después, restauradas a sus proporciones de amplitud originales. La figura 6-12b muestra los efectos de preénfasis y deénfasis sobre la relación señal-a-ruido. La Figura muestra que el preénfasis y deénfasis producen una relación señal-a-ruido más uniforme en el espectro de frecuencia de la señal modulante.

Una red de preénfasis es un filtro de pasa-altos (es decir, un diferenciador) y una red de deénfasis es un filtro de pasa-bajos (un integrador). La figura 6-13a muestra los diagramas esquemáticos para una red de preénfasis activa y una red de deénfasis pasiva. Las curvas de respuesta de frecuencia correspondientes se muestran en la figura 6-13b. Una red de preénfasis le proporciona un incremento constante en la amplitud de la señal modulante con un incremento en la frecuencia. Con FM, se logran aproximadamente 12 dB de mejoría en el rendimiento del ruido, utilizando preénfasis y deénfasis.

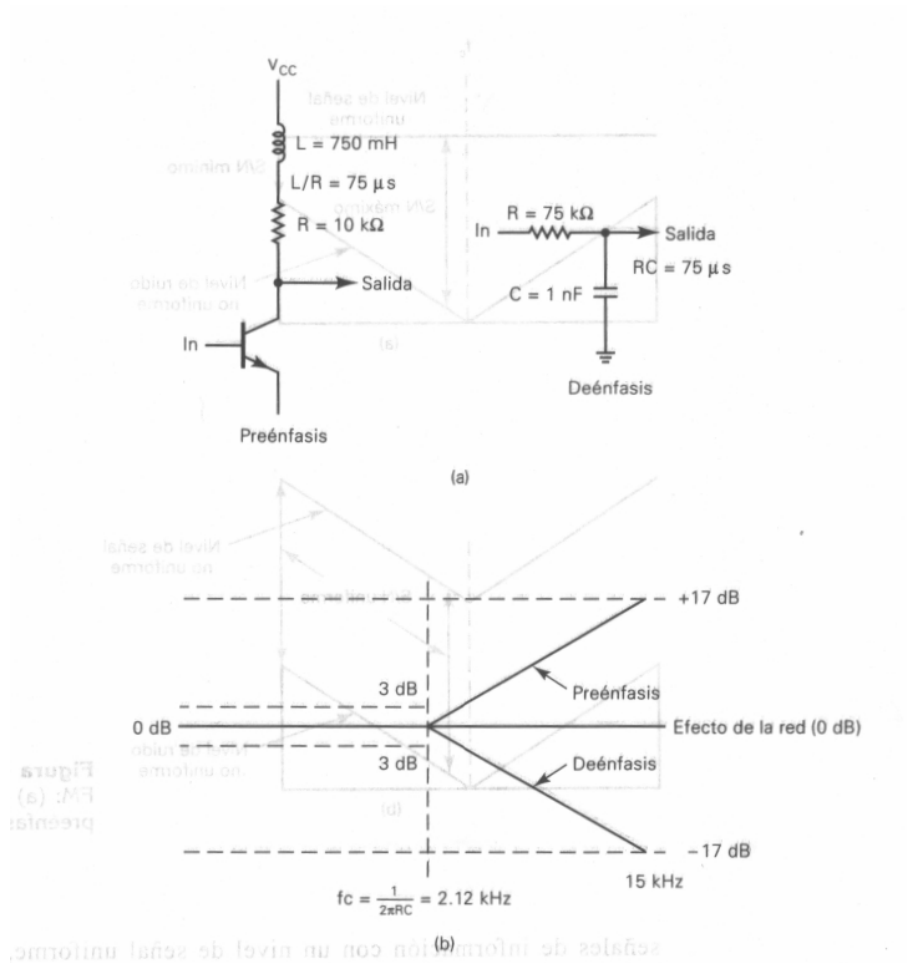


Figura 6-13 Preénfasis y deénfasis: (a) diagramas esquemáticos; (b) curvas de atenuación

La frecuencia de corte (la frecuencia en donde el preénfasis y deénfasis comienzan) se determina por la constante de tiempo RC o L/R , de la red. La frecuencia de corte ocurre en la frecuencia en donde X_c o X_L es igual a R . Matemáticamente, la frecuencia de corte es

$$f_b = \frac{1}{2\pi RC} \quad (6-35a)$$

$$f_b = \frac{1}{2\pi L/R} \quad (6-35b)$$

Las redes mostradas en la figura 6-13 son para la banda de radiodifusión de FM, la cual utiliza una constante de tiempo de $75 \text{ }\mu\text{s}$. Por lo tanto, la frecuencia de corte es aproximadamente

$$f_b = \frac{1}{2\pi 75 \mu\text{s}} = 2,12 \text{ kHz}$$

REPASO

- ◆ 6-1. Defina *modulación angular*.
- ◆ 6-2. Defina *de FM directo y de FM indirecto*.
- ◆ 6-3. Defina *PM directo y PM indirecto*.
- ◆ 6-4. Defina *desviación de frecuencia y desviación de fase*.
- ◆ 6-5. Defina *fase instantánea, desviación de fase instantánea, frecuencia instantánea y desviación de frecuencia instantánea*.
- ◆ 6-6. Defina *sensibilidad de desviación* para un modulador de frecuencia y para un modulador de fase.
- ◆ 6-7. Describa la relación entre la frecuencia de la portadora instantánea y la señal modulante para FM.
- ◆ 6-8. Describa la relación entre la fase de la portadora instantánea y la señal modulante para PM.
- ◆ 6-9. Describa la relación entre desviación de frecuencia y la amplitud y frecuencia de la señal modulante.
- ◆ 6-10. Defina *oscilación de la portadora*.
- ◆ 6-11. Defina *índice de modulación* para de FM y para PM.
- ◆ 6-12. Describa la relación entre índice de modulación y la señal modulante, para FM y para PM.
- ◆ 6-13. Defina porcentaje de modulación para las señales de modulación angular.
- ◆ 6-14. Describa la diferencia entre un modulador en frecuencia directo y un modulador en fase directo.
- ◆ 6-15. ¿Cómo puede convertirse un modulador en frecuencia a un modulador en fase; un modulador en fase a un modulador en frecuencia?
- ◆ 6-16. ¿Cuántos conjuntos de bandas laterales se producen cuando una portadora se modula, en frecuencia, por una sola frecuencia de entrada.
- ◆ 6-17. ¿Cuáles son los requerimientos para una frecuencia lateral que deben considerarse como significativas?
- ◆ 6-18. Defina índice de modulación *bajo, mediano y alto*.
- ◆ 6-19. Describa el significado de la tabla de *Bessel*.
- ◆ 6-20. Mencione la regla *general de Carson* para determinar el ancho de banda, para una onda de modulación angular.
- ◆ 6-21. Defina relación de desviación.
- ◆ 6-22. Describa la relación entre la potencia en la portadora no modulada y la potencia en la onda modulada para FM.
- ◆ 6-23. Describa la importancia del triángulo de ruido de FM.
- ◆ 6-24. ¿Qué efecto tiene la limitación sobre la forma de onda de FM compuesta?
- ◆ 6-25. Defina *preénfasis y deénfasis*.
- ◆ 6-26. Describa una red de preénfasis; una red de deénfasis.

PROBLEMAS

- 6-1.** Si un modulador de frecuencia produce 5 kHz de desviación de frecuencia, para una señal modulante de 10 V, determine la sensibilidad de desviación. ¿Cuánta desviación de frecuencia se produce para una señal modulante de 2 V?
- 6-2.** Si un modulador de fase produce 2 rad de desviación de fase, para una señal modulante de 5 V, determine la sensibilidad de desviación. ¿Cuánta desviación de fase produciría una señal modulante de 2 V?
- 6-3.** Determine (a) la desviación de frecuencia pico, (b) la oscilación de la portadora y (c) el índice de modulación para un modulador de FM con sensibilidad de desviación $K_1 = 4 \text{ kHz/V}$ y una señal modulante $V_m(t) = 10 \text{ sen}(2\pi 2000t)$. ¿Cuál es la desviación de frecuencia pico producida si la señal modulante se duplicara en amplitud?
- 6-4.** Determine la desviación de fase pico para un modulador de PM con sensibilidad de desviación $K = 1.5 \text{ rad/V}$ y señal modulante $V_m(t) = 2 \text{ sen}(2\pi 2000t)$. ¿Cuánta desviación de fase se produce para una señal modulante con el doble de amplitud?

- 6-5.** Determine el porcentaje de modulación para una estación de radiodifusión de televisión, con una desviación de frecuencia máxima $\Delta f = 50$ kHz, cuando la señal modulante produce 40 kHz de desviación de frecuencia en la antena. ¿Cuánta desviación se requiere para alcanzar 100% modulación de la portadora?
- 6-6.** De la tabla Bessel, determine el número de conjuntos de bandas laterales producidas para los siguientes índices de modulación: 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 y 10.0.
- 6-7.** Para un modulador de FM con un índice de modulación $m = 2$, la señal modulante $= v_m(t) = V_m \text{sen}(2\pi 2000t)$ y una portadora no modulada $v_c(t) = 8 \text{sen}(2\pi 800kt)$:
- Determine el número de conjuntos de bandas laterales significativas.
 - Determine sus amplitudes.
 - Dibuje el espectro de frecuencia mostrando las amplitudes relativas de las frecuencias laterales.
 - Determine el ancho de banda.
 - Determine el ancho de banda si la amplitud de la señal modulante se incrementa por un factor de 2.5.
- 6-8.** Para un transmisor de FM con una oscilación de portadora de 60 kHz, determine la desviación de frecuencia. Si la amplitud de la señal modulante disminuye por un factor de 2, determine la nueva desviación de frecuencia.
- 6-9.** Para una señal de entrada dada, un transmisor de banda de radiodifusión de FM tiene una desviación de frecuencia $\Delta f = 20$ kHz. Determine la desviación de frecuencia si la amplitud de la señal modulante se incrementa por un factor de 2.5.
- 6-10.** Un transmisor de FM tiene una frecuencia de reposo $f_c = 96$ MHz y una sensibilidad de $K_1 = 4$ kHz/V. Determine la desviación de frecuencia para una señal modulante $v_m(t) = 8 \text{sen}(2\pi 2000t)$. Determine el índice de modulación.
- 6-11.** Determine la relación de desviación y ancho de banda, en el peor de los casos, para una señal de FM con una desviación de frecuencia máxima $\Delta f = 25$ kHz y una máxima señal modulante $f_{m(max)} = 12.5$ kHz.
- 6-12.** Para un modulador de FM con una desviación de frecuencia de 40 kHz y una frecuencia de señal modulante $f_m = 10$ kHz, determine el ancho de banda utilizando la tabla de Bessel y regla de Carson.
- 6-13.** Para un modulador de FM con una amplitud de portadora no modulada $V_c = 20$ V, un índice de modulación $m = 1$ y un resistor de carga $R_L = 10 \Omega$, determine la potencia en la portadora modulada y cada frecuencia lateral y trace el espectro de potencia para la onda modulada.
- 6-14.** Para una portadora con modulación angular $v_c(t) = 2 \cos(2\pi 200 \text{ Mhz } t)$, con 50 kHz de desviación de frecuencia debido a la señal modulante y una señal de interferencia de frecuencia única $V_n(t) = 0.5 \cos(2\pi 200.01 \text{ Mhz } t)$, determine:
- La frecuencia de la señal de interferencia demodulada.
 - La desviación de frecuencia y de fase pico debida a la señal de interferencia.
 - La relación señal-a-ruido a la salida del demodulador.
- 6-15.** Determine la desviación de fase pico producida por una banda de 5 kHz de ruido aleatorio con un voltaje pico $V = 0.08$ V y una portadora $v_c(t) = 1.5 \text{sen}(2\pi 40 \times 10^6 t)$