

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTOS DE MODULACIÓN DE AMPLITUD O AMPLITUD MODULADA

C A P Í T U L O T R E S

Objetivos

Al terminar este capítulo, podrá:

- ◊ **Calcular** índices y porcentajes de modulación de una señal de AM dadas las amplitudes de la portadora y de la señal moduladora.
- ◊ **Definir** sobremodulación y **explicar** cómo aminorar sus efectos.
- ◊ **Explicar** cómo se distribuye la potencia de una señal de AM entre la portadora y las bandas laterales, y **calcular** las potencias de la portadora y de las bandas laterales dado el porcentaje de modulación.
- ◊ **Calcular** las frecuencias de las bandas laterales dadas las frecuencias de la portadora y de la señal moduladora.
- ◊ **Comparar** representaciones de una señal de AM en el dominio del tiempo, en el dominio de la frecuencia y de diagrama fasorial.
- ◊ **Explicar** qué significan los términos DBL y BLU y **destacar** las ventajas principales de una señal de BLU sobre la señal convencional de AM.
- ◊ **Calcular** la potencia pico de la envolvente (PEP, *peak envelope power*) dados los voltajes de la señal y las impedancias de la carga.

Las señales de información o de inteligencia como voz, video o datos binarios se transmiten algunas veces de un punto a otro a través de un medio de comunicación. Sin embargo, cuando las distancias involucradas son grandes, se utiliza la transmisión por radio. Si la información se transmitiera en sus frecuencias originales produciría interferencia entre las señales, por lo que es necesario recurrir al método de modulación. En el proceso de modulación en banda base, banda de voz, video o señal digital, modifica a otra señal de frecuencia más alta llamada portadora, que en general es de forma senoidal. Una portadora senoidal puede modificarse por la señal de inteligencia mediante modulación de la amplitud, modulación de la frecuencia, o por modulación de la fase. El enfoque de este capítulo es la modulación de amplitud (AM).

3-1 CONCEPTOS DE AM

Como el nombre lo sugiere, en AM, la señal de la información varía la amplitud de la onda senoidal de la portadora. El valor instantáneo de la portadora cambia de acuerdo con las variaciones de amplitud y frecuencia de la señal moduladora. La figura 3-1 muestra una señal de inteligencia de una sola frecuencia modulando a una portadora de frecuencia más alta. La frecuencia de la portadora se mantiene constante durante el proceso de modulación, pero su amplitud varía de acuerdo con la señal moduladora. Un incremento en la amplitud de la señal moduladora incrementa la amplitud de la portadora. Tanto los picos positivos como los negativos de la portadora varían con la señal moduladora. Un incremento o disminución en la amplitud de la señal moduladora causará el correspondiente aumento o disminución en los picos positivo y negativo de la amplitud de la portadora.

La línea imaginaria que conecta los picos positivo y negativo de la forma de onda de la portadora (la línea discontinua de la figura 3-1) proporciona la réplica exacta de la señal de información moduladora. Esta línea imaginaria en la forma de onda de la portadora se denomina *envolvente*.

Dado que es difícil trazar formas de onda complicadas como la que describe la figura 3-1, a menudo se simplifica representando la forma de onda de la portadora de alta frecuencia como muchas líneas verticales espaciadas regularmente, cuyas amplitudes varían de acuerdo con la señal moduladora, como se representa en la figura 3-2. Este método de representación se utiliza en todo el libro.

Las señales que ilustran las figuras 3-1 y 3-2 muestran la variación de la amplitud de la portadora con respecto al tiempo y se dice que están en el dominio del tiempo. Lo que se pre-

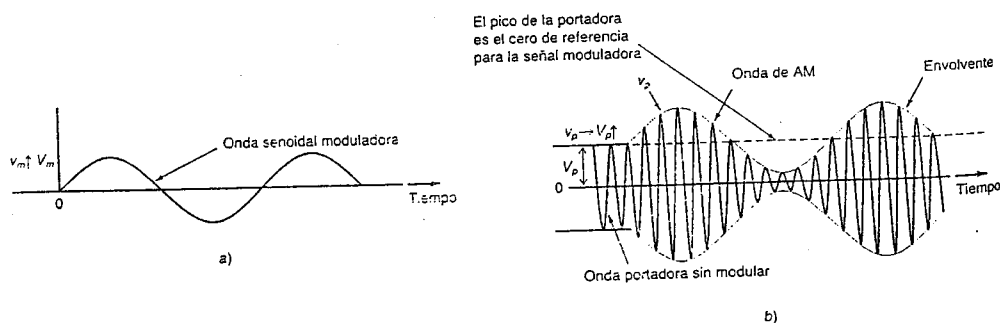


FIGURA 3-1 Amplitud modulada: a) señal moduladora o de información, b) portadora modulada.

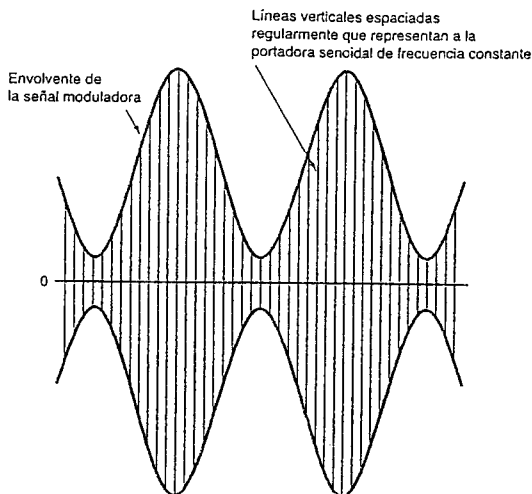


FIGURA 3-2 Método simplificado para representar una onda senoidal de alta frecuencia en AM.

senta en la pantalla de un osciloscopio, variaciones en voltaje o corriente que ocurren en el tiempo, son señales en el dominio del tiempo.

Mediante funciones trigonométricas se puede expresar la onda senoidal de la portadora con la expresión sencilla:

$$v_p = V_p \text{ sen } 2\pi f_p t$$

donde, v_p es el valor instantáneo del voltaje de la onda senoidal de la portadora en un tiempo específico dentro del ciclo; V_p representa el valor pico de la portadora senoidal no modulada medido entre cero y la amplitud máxima de las alternancias positiva o negativa (figura 3-1); f_p es la frecuencia de la onda senoidal de la portadora; y t un punto particular en el tiempo durante el ciclo de la portadora.

Una señal moduladora de forma senoidal también puede expresarse con una fórmula similar.

$$v_m = V_m \text{ sen } 2\pi f_m t$$

donde v_m = valor instantáneo de la señal de inteligencia

V_m = amplitud pico de la señal de inteligencia

f_m = frecuencia de la señal moduladora

En la figura 3-1, la señal moduladora usa el valor pico de la portadora en lugar del cero como su punto de referencia. La envolverte de dicha señal varía arriba y abajo de la amplitud pico de la portadora. Esto es, la línea cero de referencia de la señal moduladora coincide con el valor pico de la portadora no modulada. Debido a esto, las amplitudes relativas de la portadora y la mencionada señal son importantes. En general, la amplitud de la señal moduladora deberá ser menor que la amplitud de la portadora.

SUGERENCIAS Y AYUDAS

En este texto se utilizará el radián (rad) para medir todos los ángulos en tanto no se indique otra cosa. 1 rad es casi 57.3°.

Cuando la amplitud de la señal moduladora es mayor que la amplitud de la portadora, habrá distorsión que causará una transmisión incorrecta de la información. En modulación de amplitud es en particular importante que el valor pico de la señal moduladora sea menor que el valor pico de la portadora. Matemáticamente,

$$V_m < V_p$$

REPRESENTACIÓN TRIGONÓMETRICA DE ONDAS SENOIDALES

Una onda senoidal puede representarse por una expresión matemática mediante trigonometría. Si dicha onda es un voltaje, como en la figura A, entonces el voltaje instantáneo, v , está dado por la expresión

$$v = V_p \text{ sen } \theta$$

donde V_p es el valor pico de la onda senoidal y θ el ángulo sobre el eje horizontal. El ciclo completo de una onda senoidal se extiende 360° . Para encontrar el valor instantáneo del voltaje, se multiplica el valor pico de la amplitud por el seno del ángulo. Por ejemplo, considere una onda senoidal con amplitud pico de 15 V y ángulo de 60° . El voltaje instantáneo a 60° es (figura A).

$$v = 15 \text{ sen } 60^\circ = 15 (0.866) = 13 \text{ V}$$

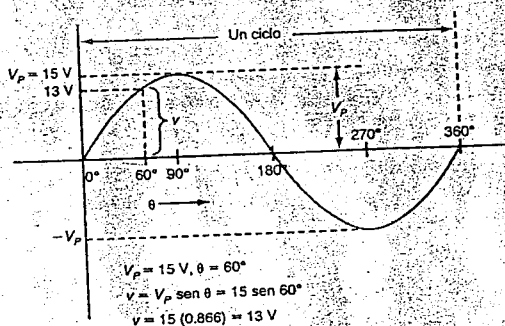


FIGURA A

El ángulo también puede expresarse en radianes. Un radián (rad) es casi igual a 57.3° . Hay 2π radianes por ciclo de una onda senoidal como muestra la figura B. Por lo tanto, hay $2\pi ft$ rad en una onda senoidal, donde f es la frecuencia de la onda y t un valor de tiempo en algún punto en el ciclo; $2\pi f$ es la velocidad angular, que en general se representa por la letra griega omega minúscula (ω), el ángulo es igual a ωt radianes y la expresión de la forma de onda toma la forma

$$v = V_p \text{ sen } 2\pi ft = V_p \text{ sen } \omega t$$

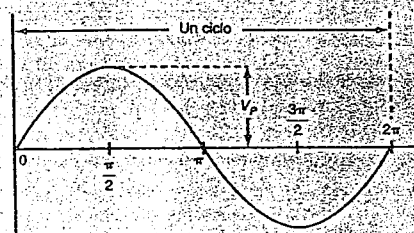


FIGURA B

En algunos casos, el eje horizontal de la onda senoidal se marca en grados o radianes para calcular el valor instantáneo del voltaje o la corriente; por lo común el eje horizontal muestra incrementos de tiempo como en la figura C.

El voltaje instantáneo a un tiempo específico en el ciclo puede calcularse como sigue. Suponga una onda senoidal con voltaje pico de 20 V y frecuencia de 5 MHz (figura C). El tiempo desde el principio del ciclo, t , es 70 ns. El voltaje instantáneo a ese tiempo es

$$v = 20 \sin 2\pi(5 \times 10^6)(70 \times 10^{-9}) = 20 \sin 2.198$$

donde 2.198 es el ángulo en radianes (note que la mayoría de las calculadoras obtienen el seno de un ángulo en radianes en forma directa). Entonces

$$v = 20 \sin 2.198 = 20 (0.80967) = 16.19 \text{ V}$$

Al convertir radianes en grados resulta el mismo valor instantáneo. Un ángulo de 2.198 rad es igual a $2.198 \times 57.3 = 125.9^\circ$. Entonces,

$$v = 20 \sin 125.9^\circ = 20 (0.80967) = 16.19 \text{ V}$$

En este texto se utilizarán medidas en radianes para todos los ángulos en tanto no se indique otra cosa.

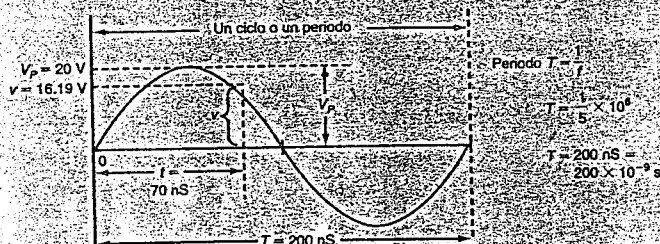


FIGURA C

¿SABÍA QUE?

Si la amplitud de la señal moduladora es mayor que la amplitud de la portadora, se producirá distorsión.

Se pueden utilizar valores de la señal portadora y de la señal moduladora para expresar la onda modulada completa. Primero, recuerde que el valor pico de la portadora es el punto de referencia para la señal moduladora; el valor de la señal moduladora se suma o resta del valor pico de la portadora. El valor instantáneo, ya sea del máximo o del mínimo de la envolvente de voltaje, v_1 , puede calcularse mediante la expresión

$$v_1 = V_p + v_m = V_p + V_m \text{ sen } 2\pi f_m t$$

que representa el hecho de que el valor instantáneo de la señal moduladora se suma en forma algebraica al valor pico de la portadora. Por lo tanto, puede escribirse el valor instantáneo de la onda modulada completa v_2 sustituyendo v_1 por el valor pico del voltaje de la portadora, V_p , como sigue:

$$v_2 = v_1 \text{ sen } 2\pi f_p t$$

Ahora, al sustituir la expresión que antes se obtuvo para v_1 y desarrollarla, se obtiene lo siguiente:

$$v_2 = (V_p + V_m \text{ sen } 2\pi f_m t) \text{ sen } 2\pi f_p t = V_p \text{ sen } 2\pi f_p t + (V_m \text{ sen } 2\pi f_m t) (\text{sen } 2\pi f_p t)$$

donde v_2 es el valor instantáneo de la onda de AM (o v_{AM}), $V_p \text{ sen } 2\pi f_p t$ es la forma de onda de la portadora, y $(V_m \text{ sen } 2\pi f_m t) (\text{sen } 2\pi f_p t)$ es la forma de onda de la portadora multiplicada por la forma de onda de la señal moduladora. La segunda parte de la expresión es característica de la señal de AM. Un circuito debe ser capaz de producir una multiplicación matemática de la portadora y las señales de modulación para que se presente la modulación de amplitud AM. La onda de AM es el producto de la portadora y las señales moduladoras.

El circuito que se utiliza para producir AM se llama *modulador*. Sus dos entradas, la señal portadora, la señal moduladora y las salidas resultantes, se muestran en la figura 3-3. Los moduladores de amplitud realizan el producto de la portadora y las señales moduladoras. Otros circuitos que realizan el producto de dos señales analógicas también se llaman multiplicadores analógicos, mezcladores, convertidores, detectores de producto y detectores de fase. El circuito que convierte una señal de inteligencia o en banda base de baja frecuencia en una señal de frecuencia más alta por lo común se llama modulador. Un circuito que cambia una señal de frecuencia alta a una más baja en general se llama mezclador. El circuito que se utiliza para recuperar la señal de inteligencia original de una onda de AM se conoce como detector o demodulador. Las aplicaciones para la mezcla y detección se discuten con todo detalle en los capítulos siguientes.

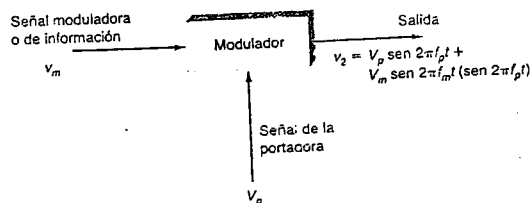


FIGURA 3-3 Modulador de amplitud mostrando las señales de entrada y salida.

3-2 ÍNDICE DE MODULACIÓN Y PORCENTAJE DE MODULACIÓN

Como se estableció, para que haya modulación de amplitud AM sin distorsión, el voltaje de la señal moduladora, V_m , debe ser menor que el voltaje de la portadora, V_p . Por lo tanto, la relación entre la amplitud de la señal moduladora y la amplitud de la señal portadora es importante. La relación, que se conoce como *índice de modulación* m (también llamado factor o coeficiente de modulación, o grado de modulación), es el cociente de

$$m = \frac{V_m}{V_p}$$

Estos son los valores pico de las señales y el voltaje de la portadora es el valor sin modulación.

Al multiplicar el índice de modulación por 100 se obtiene el *porcentaje de modulación*; por ejemplo, si el voltaje de la señal portadora es 9 V y el de la señal moduladora 7.5 V, el factor de modulación es 0.8333 y el porcentaje de modulación $0.8333 \times 100 = 83.33$.

SOBREMULACIÓN Y DISTORSIÓN

El índice de modulación deberá ser un número entre 0 y 1. Si la amplitud del voltaje de la moduladora es mayor que la del voltaje de la portadora, m será mayor que 1, causando distorsión de la forma de onda modulada. Si la distorsión es lo bastante grande, la señal de inteligencia se torna ininteligible. La distorsión en las transmisiones de voz produce mutilaciones, asperezas o sonidos no naturales en la bocina y la distorsión de las señales de video produce imágenes revueltas y de poca calidad en la pantalla del televisor.

La figura 3-4 muestra un ejemplo sencillo de distorsión. Aquí, una señal de información de forma senoidal está modulando a una portadora senoidal, pero el voltaje de la moduladora es mucho mayor que el voltaje de la portadora, de lo que resulta una condición llamada *sobre-*

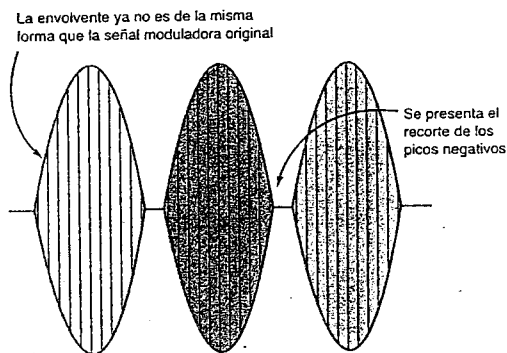


FIGURA 3-4 Distorsión de la envolvente causada por sobremodulación donde la amplitud de la señal moduladora, V_m , es mayor que la de la portadora, V_p .

¿SABÍA QUE?

La distorsión causada por la sobremodulación también produce interferencia con el canal adyacente.

modulación. Como puede verse, la forma de onda es plana en la línea cero. La señal recibida producirá una forma de onda de salida igual que la de la envolvente, que en este caso es una forma de onda senoidal cuyos picos negativos se han recortado. Si la amplitud de la señal moduladora es menor que la amplitud de la portadora, no se producirá distorsión. La condición ideal para AM es donde $V_m = V_p$ o $m = 1$, lo que proporciona 100% de modulación. Esto da una máxima potencia de salida en el transmisor y el máximo voltaje de salida en el receptor, sin distorsión.

Prevenir la sobremodulación es engañoso; por ejemplo, en el tiempo, durante las transmisiones de voz, éstas pasarán de amplitud baja a amplitud alta. Por lo común, la amplitud de la señal moduladora se ajusta para que sólo los picos de la voz produzcan el 100% de modulación, lo que previene la sobremodulación y la distorsión. Sin embargo, se requieren circuitos automáticos llamados *circuitos de compresión* para resolver este problema, amplificando las señales de bajo nivel y suprimiendo o comprimiendo las de alto nivel. En consecuencia hay un nivel promedio de potencia mayor sin caer en la sobremodulación.

La distorsión causada por la sobremodulación también genera interferencia en los canales adyacentes. La distorsión genera una señal de información no senoidal. De acuerdo con la teoría de Fourier, cualquier señal no senoidal se puede tratar como onda senoidal fundamental en la frecuencia de la señal de información, más armónicos. Como se vio en el capítulo 2, éstas son ondas senoidales cuyas frecuencias son múltiplos de la frecuencia fundamental. Una onda senoidal distorsionada de 500 Hz podría contener la segunda, tercera, cuarta, etcétera, armónicas de 1 000 Hz, 1 500 Hz, 2 000 Hz, etcétera. Es obvio que estas armónicas también modulan a la portadora y pueden causar interferencia a otras señales en canales adyacentes a la portadora.

PORCENTAJE DE MODULACIÓN

El índice de modulación puede determinarse midiendo los valores reales de los voltajes de la moduladora y de la portadora y calcular su relación: sin embargo, es más común determinar el índice de modulación partiendo de mediciones tomadas de la forma de onda compuesta. Cuando en la pantalla de un osciloscopio se presenta una señal de AM, el índice de modulación se puede calcular con los valores de $V_{m\max}$ y $V_{m\min}$ como muestra la figura 3-5. El valor pico de la señal moduladora, V_m , es la mitad de la diferencia entre los valores pico y el mínimo.

$$V_m = \frac{V_{m\max} - V_{m\min}}{2}$$

Como muestra la figura 3-5, $V_{m\max}$ es el valor pico de la señal durante la modulación, y $V_{m\min}$ el valor más bajo de la onda modulada. El $V_{m\max}$ es la mitad del valor pico a pico de la señal de AM, o $V_{m\max} = V_p/2$. Restando $V_{m\min}$ de $V_{m\max}$ produce el valor pico a pico de la señal moduladora. La mitad de esto, por supuesto, es sólo el valor pico.

El valor pico de la señal portadora, V_p , es el promedio de los valores de:

$$V_p = \frac{V_{m\max} + V_{m\min}}{2}$$

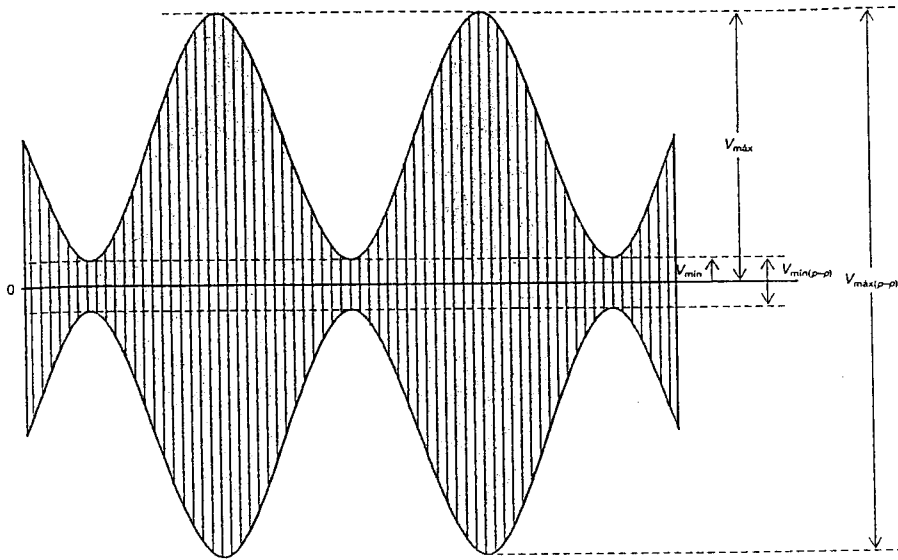
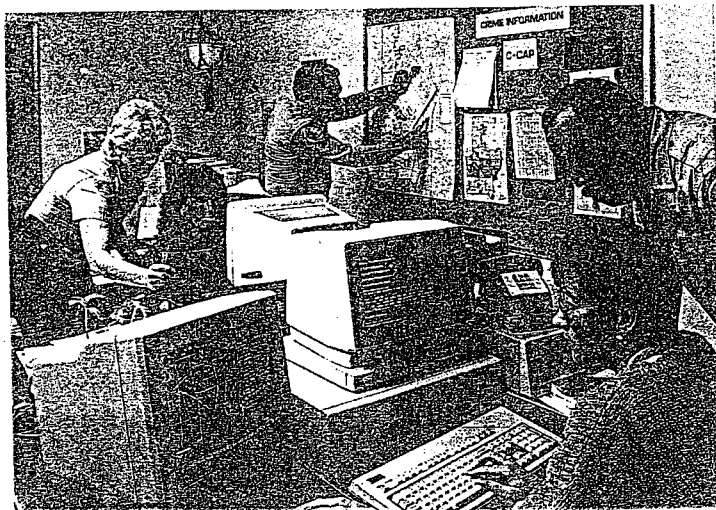


FIGURA 3-5 Onda de AM que describe los picos (V_{\max}) y las depresiones (V_{\min}).

El índice de modulación es

$$m = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max} + V_{\min}}$$

Los valores para $V_{\max(p-p)}$ y $V_{\min(p-p)}$ pueden leerse de manera directa en la pantalla del osciloscopio e insertarlos en la fórmula para calcular el índice de modulación.



En Carson, California, los colaboradores del alguacil del condado de Los Angeles trabajan muy cerca del personal de comunicaciones para coordinar las actividades policíacas.

La cantidad o profundidad de AM por lo común se expresa como porcentaje de modulación en vez de valor fraccionario. En el ejemplo 3-1, el porcentaje de modulación es $100 \times m$, o 66.2%. El máximo porcentaje de modulación sin distorsión de la señal es, por supuesto, 100%, donde V_p y V_m son iguales. En este momento, $V_{\min} = 0$ y $V_{\max} = 2 V_m$ donde V_m es el valor pico de la señal moduladora.

Ejemplo 3-1

Si en una señal de AM el valor $V_{\max(p-p)}$ leído en la gráfica de la pantalla del osciloscopio es 5.9 divisiones y $V_{\min(p-p)}$ es 1.2 divisiones.

a) ¿Cuál es el índice de modulación?

$$m = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max} + V_{\min}} = \frac{5.9 - 1.2}{5.9 + 1.2} = \frac{4.7}{7.1} = 0.662$$

b) Calcule V_p , V_m y m si la escala vertical es 2 V por división. (Sugerencia: haga un croquis de la señal.)

$$V_p = \frac{V_{\max} + V_{\min}}{2} = \frac{5.9 + 1.2}{2} = \frac{7.1}{2} = 3.55 @ \frac{2 \text{ V}}{\text{div}}$$

$$V_p = 3.55 \times 2 \text{ V} = 7.1 \text{ V}$$

$$V_m = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2} = \frac{(5.9 - 1.2)}{2} = \frac{4.7}{2}$$

$$= 2.35 @ \frac{2 \text{ V}}{\text{div}}$$

$$V_m = 2.35 \times 2 \text{ V} = 4.7 \text{ V}$$

$$m = \frac{V_m}{V_p} = \frac{4.7}{7.1} = 0.662$$

3-3 BANDAS LATERALES Y EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

Siempre que una portadora es modulada por una señal de información, como parte del proceso aparecen nuevas señales en frecuencias diferentes. Estas nuevas frecuencias se llaman *frecuencias laterales* o *bandas laterales* y se presentan en el espectro de frecuencias de manera directa arriba y abajo de la frecuencia de la portadora. Más específicamente, las bandas laterales se presentan en frecuencias que son la suma y diferencia de las frecuencias de la portadora y de la moduladora. Cuando se trata de señales formadas por más de una frecuencia, es mejor mostrar la señal de AM en el dominio de la frecuencia en vez del dominio del tiempo.

CÁLCULOS DE BANDA LATERAL

Al utilizar una sola señal moduladora senoidal, el proceso de modulación genera dos bandas laterales. Si la señal moduladora es una onda complicada, como voz o video, un intervalo de frecuencias amplio modula a la portadora y, en consecuencia, se genera un considerable número de bandas laterales.

La banda lateral superior, f_{BLS} y la banda lateral inferior f_{BLI} se obtienen de

$$f_{BLS} = f_p + f_m \quad y \quad f_{BLI} = f_p - f_m$$

donde f_p es la frecuencia de la portadora y f_m la frecuencia moduladora.

La existencia de las bandas laterales puede demostrarse matemáticamente, empezando con la ecuación para la señal de AM antes descrita.

$$v_{AM} = V_p \text{ sen } 2\pi f_p t + (V_m \text{ sen } 2\pi f_m t) (\text{sen } 2\pi f_p t)$$

Al utilizar la identidad trigonométrica que dice que el producto de dos ondas senoidales es

$$\text{sen } A \text{ sen } B = \frac{\cos (A - B)}{2} - \frac{\cos (A + B)}{2}$$

y sustituir esta identidad dentro de la expresión de una onda modulada, el valor instantáneo de la amplitud de la señal se expresa

$$V_{AM} = V_p \text{ sen } 2\pi f_p t + \frac{V_m}{2} \cos 2\pi t(f_p - f_m) - \frac{V_m}{2} \cos 2\pi t(f_p + f_m)$$

donde el primer término es la portadora, el segundo que tiene la diferencia $f_p - f_m$ la banda lateral inferior y el tercero, que comprende la suma $f_p + f_m$ la banda lateral superior.

Por ejemplo, si un tono de 400 Hz modula una portadora de 300 kHz, las bandas laterales superior e inferior son

$$\begin{aligned} f_{BLS} &= 300\,000 + 400 = 300\,400 \text{ Hz o } 300.4 \text{ kHz} \\ f_{BLI} &= 300\,000 - 400 = 299\,600 \text{ Hz o } 299.6 \text{ kHz} \end{aligned}$$

Al observar una señal de AM en un osciloscopio, pueden verse las variaciones de amplitud de la portadora con respecto al tiempo. Esta presentación en el dominio del tiempo no proporciona una indicación visible de la existencia de las bandas laterales, no obstante que éstas se generan en el proceso de modulación, como muestra la ecuación anterior. La señal de AM es en realidad una señal compuesta formada por varios componentes; la onda senoidal de la portadora se suma a las bandas laterales superior e inferior, como indica la ecuación. Esto se ilustra de modo gráfico en la figura 3-6. Al sumar estas señales algebraicamente en cada punto instantáneo a lo largo del eje del tiempo y trazando el resultado, se obtiene la onda de AM que describe la figura, que es una onda senoidal en la frecuencia de la portadora cuya amplitud varía según lo determina la señal moduladora.

REPRESENTACIÓN DE UNA SEÑAL DE AM EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

Otro método para mostrar las señales de las bandas laterales es trazar las amplitudes de la portadora y de las bandas laterales con respecto a la frecuencia, como muestra la figura 3-7. Aquí, el eje horizontal representa frecuencia y el eje vertical las amplitudes de las señales. Las señales pueden ser voltaje, corriente o magnitudes de la potencia y pueden expresarse en valores pico o rms. El trazo de la amplitud de una señal contra la frecuencia se denomina *representación en el dominio de la frecuencia*. El instrumento conocido como *analizador de espectros* se emplea para presentar una señal en el dominio de la frecuencia.

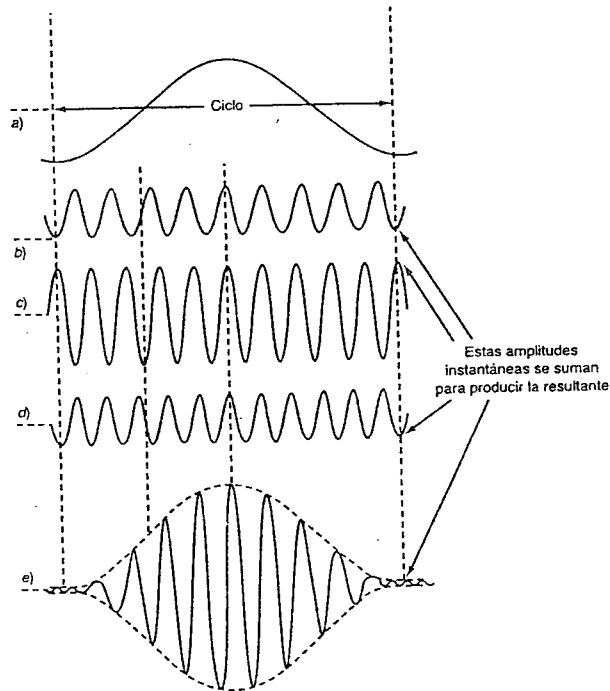


FIGURA 3-6 La onda AM es la suma algebraica de las ondas senoidales de la portadora y de las bandas laterales superior e inferior. a) Inteligencia o señal moduladora, b) banda lateral inferior, c) portadora, d) banda lateral superior, e) onda compuesta de AM.

La figura 3-8 muestra la relación entre las presentaciones en el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia de una señal de AM. Los ejes de tiempo y la frecuencia son perpendiculares. Las amplitudes que se muestran en la representación en el dominio de la frecuencia son los valores pico de la portadora y de las ondas senoidales de las bandas laterales.

Como casi siempre, la señal moduladora es más complicada que un solo tono senoidal, en el proceso de AM se producen múltiples bandas laterales superiores e inferiores; por ejemplo, una señal de voz consiste en muchos componentes senoidales de frecuencias diferentes

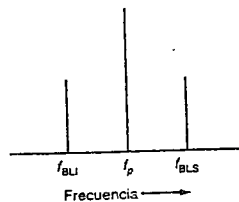


FIGURA 3-7 Representación de una señal de AM en el dominio de la frecuencia.

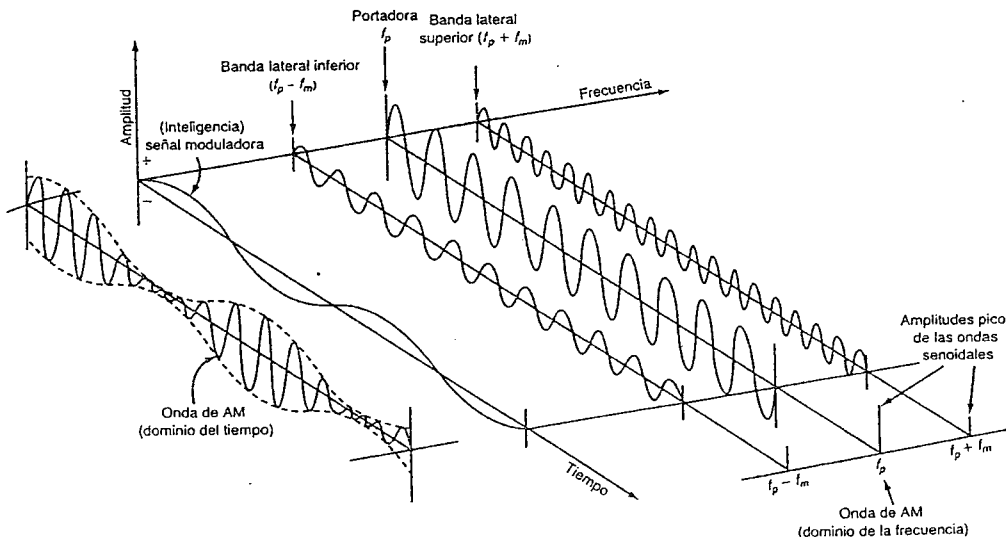


FIGURA 3-8 Relación entre dominio en el tiempo y dominio en la frecuencia.

mezcladas entre ellas. Recuerde que las frecuencias de la voz se presentan en el intervalo de 300 a 3 000 Hz. Por lo tanto, las señales de voz producen un amplio número de frecuencias arriba y abajo de la frecuencia de la portadora como describe la figura 3-9. Estas bandas laterales ocupan espacio en el espectro. El ancho de banda total de una señal de AM se obtiene de las frecuencias laterales máxima y mínima. Esto se hace encontrando la suma y diferencia de la frecuencia portadora y la máxima frecuencia moduladora (3 000 Hz, o 3 kHz de la figura 3-9); por ejemplo, si una frecuencia portadora es de 2.8 MHz (2 800 kHz), entonces las frecuencias máxima y mínima de las bandas laterales son:

$$f_{BLS} = 2\,800 + 3 = 2\,803 \text{ kHz} \quad \text{y} \quad f_{BLI} = 2\,800 - 3 = 2\,797 \text{ kHz}.$$

El ancho total de la banda es sólo la diferencia entre las frecuencias superior e inferior de las bandas laterales

$$BW = f_{BLS} - f_{BLI} = 2\,803 - 2\,797 = 6 \text{ kHz}$$

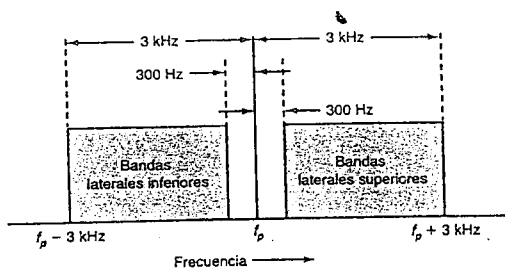


FIGURA 3-9 Bandas laterales superior e inferior de una señal de voz moduladora de AM.

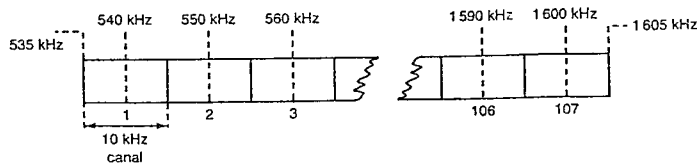


FIGURA 3-10 Espectro de frecuencias de la banda de radiodifusión de AM.

Como puede verse, el ancho de banda de una señal de AM es dos veces la frecuencia más alta de la señal moduladora: $BW = 2f_m$, donde f_m es la máxima frecuencia moduladora. En una señal de voz cuya máxima frecuencia es 3 kHz, el ancho de banda total es sólo

$$BW = 2 (3 \text{ kHz}) = 6 \text{ kHz}$$

Ejemplo 3-2

Una estación de radiodifusión estándar de AM puede transmitir frecuencias moduladoras hasta de 5 kHz. Si la estación de AM está transmitiendo en una frecuencia de 980 kHz, calcule las frecuencias de las bandas laterales máxima superior, mínima inferior y el ancho de banda total ocupado por la estación de AM.

$$f_{BLS} = 980 + 5 = 985 \text{ kHz}$$

$$f_{BLI} = 980 - 5 = 975 \text{ kHz}$$

$$BW = f_{BLS} - f_{BLI} = 985 - 975 = 10 \text{ kHz} \quad \circ$$

$$BW = 2(5 \text{ kHz}) = 10 \text{ kHz}$$

Como indica el ejemplo 3-2, una estación de radiodifusión de AM tiene un ancho de banda total de 10 kHz. Además, las estaciones de radiodifusión de AM están espaciadas cada 10 kHz a través del espectro de 540 kHz a 1 600 kHz. Esto se ilustra en la figura 3-10. Las bandas laterales de la primera frecuencia de radiodifusión se extienden hacia abajo hasta 535 kHz y hacia arriba hasta 545 kHz, formando un canal de 10 kHz para la señal. La frecuencia del canal más alto es 1 600 kHz, con bandas laterales que se extienden desde 1 595 kHz hasta 1 605 kHz. Hay en total 107 canales de 10 kHz de ancho para las estaciones de radio de AM.

MODULACIÓN POR PULSOS

Cuando se modula una portadora con señales complicadas como pulsos u ondas rectangulares, se produce un amplio espectro de bandas laterales. De acuerdo con la teoría de Fourier, las señales complicadas como ondas cuadradas, ondas triangulares, diente de sierra, y ondas senoidales distorsionadas, sólo están formadas de una onda senoidal fundamental y numerosas señales de armónicas con diferentes amplitudes. Suponga que una portadora es modulada en amplitud por una onda cuadrada compuesta de una onda senoidal fundamental y todas las ar-

mónicas impares. Una onda moduladora cuadrada, producirá bandas laterales en frecuencias basadas en la onda senoidal fundamental, así como en la tercera, quinta, séptima, etcétera armónicas; en consecuencia resulta una presentación en el dominio de la frecuencia, como muestra la figura 3-11. Como se observa, los pulsos generan señales de ancho de banda muy grandes. Para que una onda cuadrada se pueda transmitir y recibir fielmente, sin distorsión o degradación, todas las bandas laterales más significativas deberán pasar por las antenas y por los circuitos de transmisión y recepción.

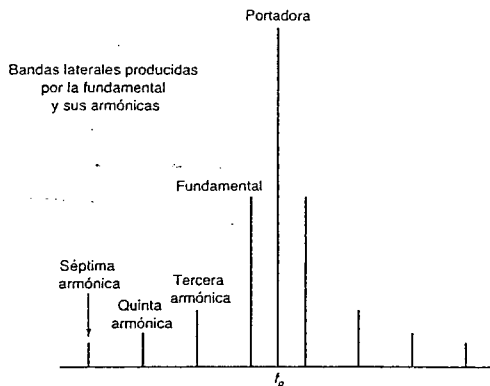


FIGURA 3-11 Espectro de frecuencia de una señal de AM modulada por una onda cuadrada.

La figura 3-12 muestra la forma de onda de AM que se produce cuando una onda cuadrada modula a una portadora dada y modula a una portadora senoidal. En la figura 3-12a), el porcentaje de modulación es 50; en la 3-12b), 100. En este caso, cuando la onda cuadrada va en sentido negativo, la amplitud de la portadora es cero. La modulación de amplitud por ondas cuadradas o pulsos binarios rectangulares se conoce como *corrimiento de amplitud por llaveo* (ASK, *amplitude shift keying*). Se usa en algunos tipos de comunicación de datos donde se transmite información binaria.

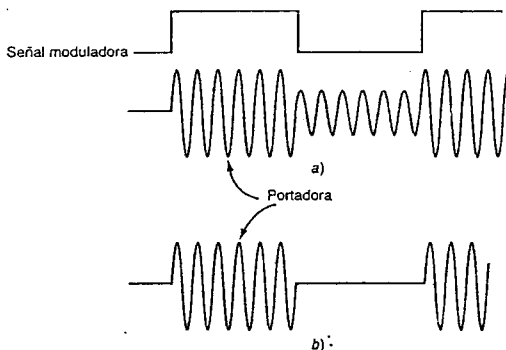


FIGURA 3-12 Modulación de la amplitud de una portadora senoidal por un pulso u onda rectangular, llamada *corrimiento de amplitud por llaveo*. a) 50% de modulación, b) 100% de modulación.

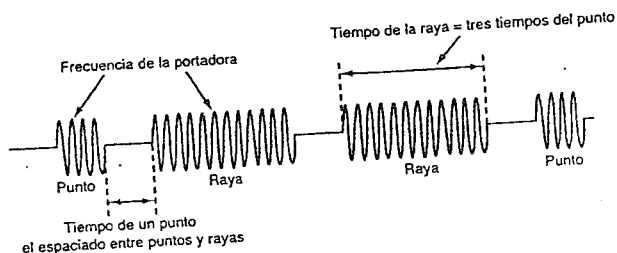


FIGURA 3-13 Envío de la letra P por el código Morse. Ejemplo de llaveo de ENCENDIDO-APAGADO (OOK, on-off keying).

Otro tipo rudimentario de modulación de amplitud puede obtenerse al apagar y encender la portadora. Un ejemplo es la transmisión en código Morse con puntos y rayas. Un punto se forma por unos cuantos ciclos de la portadora, mientras que una raya lo está por más ciclos de la portadora. La figura 3-13 muestra la transmisión de la letra P, la cual es punto-rayas-punto (pronunciado tic-tac-tac-tic). La duración de la raya es tres veces la longitud del punto y el espaciado entre puntos y rayas es el tiempo de un punto. Las transmisiones en un código como éste en general se denominan como de onda continua (CW, *continuous wave*). Esta forma de transmisión también se designa llaveo de ENCENDIDO-APAGADO.

A pesar de que sólo se transmite la portadora, estas señales ENCENDIDO-APAGADO generan bandas laterales. Las bandas laterales resultan de la frecuencia o periodo de repetición de los pulsos mismos, más sus armónicas.

Como se indicó al principio, la distorsión de una señal analógica producida por la sobremodulación, también genera armónicas; por ejemplo, el espectro que produce una onda senoidal moduladora de 500 Hz modulando una portadora de 1 MHz, se muestra en la figura 3-14a). El ancho de banda total de la señal es 1 kHz. Sin embargo, si se distorsiona la señal moduladora, aparecerán las armónicas segunda, tercera, cuarta y otras mayores. Estas armónicas también modularán a la portadora produciendo más bandas laterales como ilustra la figura 3-14b). Ahora suponga que la distribución es de tal naturaleza que las amplitudes de las armónicas más allá de la cuarta son insignificantes (por lo general menos del 1%); entonces el ancho de banda total de la señal resultante será de casi 4 kHz en lugar del ancho de banda de 1 kHz, que resulta sin sobremodulación y distorsión de la señal. Las armónicas pueden invadir otros canales adyacentes, donde pueden estar presentes otras señales y causarles interferencia. Este tipo de interferencia de armónicas en la banda lateral, se denomina algunas veces radiación espuria (*splatter*) debido a la forma como suena en el receptor. Tanto la sobremodulación como la radiación espuria se pueden eliminar con facilidad reduciendo el nivel de la señal de modulación, ya sea mediante el control de ganancia o por medio del uso de circuitos limitadores de la amplitud o circuitos de compresión de la señal.

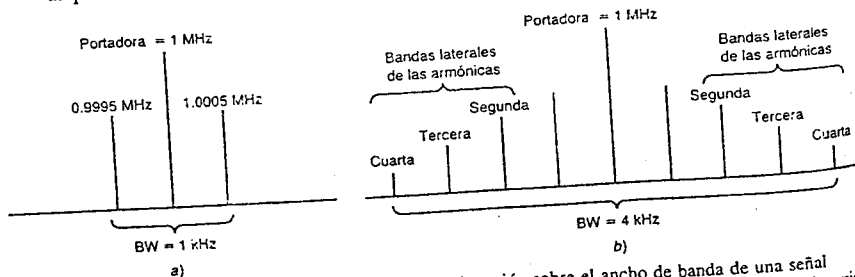


FIGURA 3-14 Efecto de la sobremodulación y la distorsión sobre el ancho de banda de una señal de AM: a) onda senoidal de 500 Hz modulando a una portadora de 1 MHz; b) onda senoidal distorsionada de 500 Hz con armónicas segunda, tercera y cuarta de nivel significativo.

Fasor es el término que algunas veces se utiliza para representar ondas senoidales en el análisis de circuitos. Un fasor es una línea o flecha cuya longitud es proporcional al valor pico de la onda senoidal que se está representando. Se supone que el fasor está girando sobre un eje en el sentido contrario al de las manecillas del reloj, como muestra la figura 3-15a). El ángulo entre el fasor y el eje horizontal representa el ángulo dentro del ciclo en un tiempo dado.

El fasor forma un triángulo rectángulo con el eje, y la altura de éste es proporcional al seno del ángulo. Al trazar los valores de altura a los ángulos de cero a 360° o 2π rad, se obtiene la curva que muestra la figura 3-15b), que representa un ciclo de la onda senoidal para una rotación completa de 360° del fasor.

En la figura 3-15c) se ilustra la suma de fasores. Esto es el equivalente de sumar dos ondas senoidales de la misma frecuencia, pero con amplitud y fase (tiempo) diferentes. Los fasores tienen distintas longitudes debido a las diferentes amplitudes pico de las ondas senoidales que representan. La suma se obtiene formando un paralelogramo con los fasores y trazando la diagonal cuya longitud es la suma de los fasores.

Para representar una señal de AM con fasores, éstos se utilizan separados para la portadora y para cada banda lateral. Su longitud son los valores pico del voltaje de la portadora, de la banda lateral superior y de la inferior. Suponga la señal sencilla que resulta cuando una portadora senoidal es modulada 100% por una señal de inteligencia de forma senoidal. Al sumar estas tres ondas senoidales se obtiene una onda de AM como la que describe la figura 3-6. En la 3-15d) se muestra la representación fasorial de esta señal de AM. Los fasores de las bandas laterales se ilustran al final del fasor de la portadora. A medida que el fasor de la portadora gira delineando ésta, los dos fasores de las bandas laterales también giran sobre la punta del fasor de la portadora. El fasor de la banda lateral inferior gira a una velocidad un poco más baja que la de la portadora debido a que está en una frecuencia menor. El fasor de la banda lateral superior gira a una velocidad un poco mayor que la de la portadora. Para indicar esto, en los fasores de las bandas laterales las flechas se muestran girando en direcciones opuestas. La resultante o suma de los fasores de las bandas laterales se suma al fasor de la portadora. En el 100% de modulación, la longitud de los fasores de las bandas laterales es de la mitad del fasor de la portadora.

La figura 3-15e) muestra las amplitudes resultantes en el momento que los fasores están en varias posiciones en sus ciclos. En la posición 1, cuando los dos fasores de las bandas laterales coinciden, con ambos apuntando hacia arriba, se suman, lo que produce una resultante del doble de la amplitud de la banda lateral, la cual se suma al fasor de la portadora. Este resultado corresponde al 100% de modulación. En la posición 2, en el momento que los fasores están separados 180° , se cancelan de modo efectivo uno a otro, dando una suma que es justamente la amplitud de la portadora. En la posición 3, cuando coinciden los fasores de banda lateral, con ambos apuntando hacia abajo, de nuevo se suman, formando una resultante del doble de la amplitud de la banda lateral. Sin embargo, ahora se restan de la portadora, dando como resultante cero.

Tal vez es difícil visualizar tres fasores todos girando a diferentes velocidades, sumándose y restándose y produciendo la onda de AM. La figura 3-16 muestra la forma de conceptualizar este proceso. Primero, suponga que el fasor de la portadora permanece fijo, señalando hacia arriba mientras que los fasores de las bandas laterales superior e inferior se dejan girar. La onda resultante trazada por la suma algebraica de los fasores es la envolvente de la onda de AM, que corresponde a la señal de inteligencia o onda senoidal moduladora. Enseguida imagine al fasor de la portadora girando también; la señal resultante es la onda completa de AM.

SUGERENCIAS Y AYUDAS

El ancho de banda total es la diferencia entre las frecuencias de las bandas laterales superior e inferior.

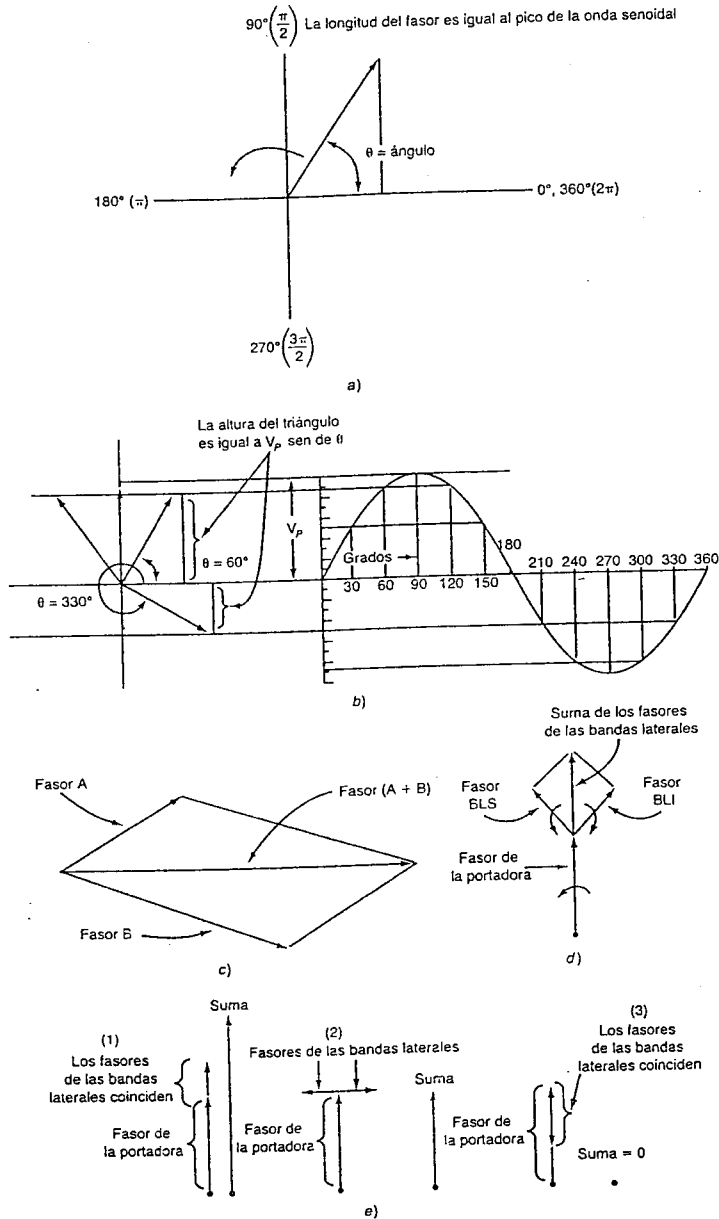


FIGURA 3-15 Representación fasorial de una onda senoidal: a) un vector giratorio o fasor constituye otra forma de representar una onda senoidal; b) fasor relacionado con una presentación en el dominio del tiempo; c) suma de fasores trazando el paralelogramo y su diagonal; d) fasor de AM, e) suma de fasores en varias posiciones.

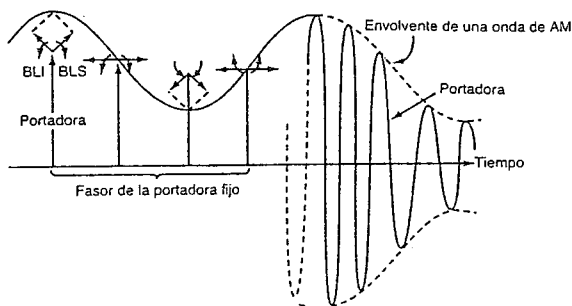


FIGURA 3-16 Suponiendo un fasor de la portadora vertical y fijo, mientras los fasores de las bandas laterales giran, su suma algebraica traza la envolvente de la portadora.

A menudo se utilizan más las presentaciones de señales de AM en el dominio del tiempo o en el de la frecuencia; sin embargo, el uso de los trazos con fasores puede ayudar a dar una representación visual de algunos tipos de circuitos.

3-4 POTENCIA EN AM

En las transmisiones de radio, la señal de AM se amplifica en un amplificador de potencia y se alimenta a la antena con una impedancia característica que, idealmente, es pero no en modo necesario, pura resistencia. La señal de AM en realidad está compuesta de señales de varios voltajes, a saber la portadora y las dos bandas laterales y cada una de estas señales lleva potencia a la antena. La potencia total transmitida, P_T , es sólo la suma de la potencia de las dos bandas laterales, P_{BLS} y P_{BLI} :

$$P_T = P_p + P_{BLI} + P_{BLS}$$

Regresando a la ecuación original de AM, puede verse cómo se distribuye y calcula la potencia:

$$V_{AM} = V_p \sin 2\pi f_p t + \frac{V_m}{2} \cos 2\pi t(f_p - f_m) - \frac{V_m}{2} \cos 2\pi t(f_p + f_m)$$

donde el primer término es la portadora, el segundo la banda lateral inferior y el tercero la banda lateral superior.

Ahora, recuerde que V_p y V_m son valores pico de las ondas senoidales de la portadora y de la señal moduladora. Para calcular la potencia debemos usar valores rms de los voltajes. Podemos convertir un valor pico en valor rms con sólo dividir el valor pico entre $\sqrt{2}$ o multiplicar por 0.707. El valor rms de los voltajes de la portadora y de las bandas laterales es

$$V_{AM} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \sin 2\pi f_p t + \frac{V_m}{2\sqrt{2}} \cos 2\pi t(f_p - f_m) - \frac{V_m}{2\sqrt{2}} \cos 2\pi t(f_p + f_m)$$

La potencia en la portadora y en las bandas laterales puede calcularse con la fórmula $P = V^2/R$, donde P es la potencia de salida, V el valor rms del voltaje de salida y R la parte resis-

tiva de la impedancia de carga, que en general es una antena. Sólo se necesita utilizar los coeficientes en la fórmula de la potencia:

$$P_T = \frac{(V_p/\sqrt{2})^2}{R} + \frac{(V_m/2\sqrt{2})^2}{R} + \frac{(V_m/2\sqrt{2})^2}{R} = \frac{(V_p)^2}{2R} + \frac{(V_m)^2}{8R} + \frac{(V_m)^2}{8R}$$

Si se recuerda que se puede expresar la señal moduladora, V_m , en términos de la portadora mediante la expresión para el índice de modulación, $m = V_m/V_p$, se puede escribir

$$V_m = mV_p$$

Al expresar ahora las potencias de las bandas laterales en términos de la potencia de la portadora, la potencia total es

$$P_T = \frac{(V_p)^2}{2R} + \frac{(mV_p)^2}{8R} + \frac{(mV_p)^2}{8R} = \frac{(V_p)^2}{2R} + \frac{(m^2V_p^2)}{8R} + \frac{(m^2V_p^2)}{8R}$$

Como el término $(V_p)^2/2R$ es igual al valor rms de la potencia de la portadora, puede simplificarse y resulta

$$P_T = \frac{(V_p)^2}{2R} \left(1 + \frac{m^2}{4} + \frac{m^2}{4} \right)$$

Por último se obtiene una fórmula sencilla para calcular la potencia total en una señal de AM cuando se conoce la potencia de la portadora y el porcentaje de modulación.

$$P_T = P_p \left(1 + \frac{m^2}{2} \right)$$

Por ejemplo, si la portadora de un transmisor de AM es de 1 000 W y se modula al 100% ($m = 1$), la potencia total de AM es

$$P_T = 1000 \left(1 + \frac{1^2}{2} \right) = 1\,500\text{ W}$$

De la potencia total, 1 000 W de la misma se encuentran en la portadora. Eso deja 500 W en ambas bandas laterales, pero como éstas son iguales, cada una tiene 250 W.

Para un transmisor de AM que modula al 100%, la potencia total en las bandas laterales es siempre la mitad de la potencia de la portadora. Una portadora de 50 kW de un transmisor que se modula al 100%, tendrá una potencia para las bandas laterales de 25 kW, o sea, 12.5 kW para cada banda lateral. La potencia total para la señal de AM es la suma de las potencias de la portadora y de las bandas laterales, esto es, 75 kW.

En el momento que el porcentaje de modulación es menor que el óptimo de 100, hay mucha menor potencia en las bandas laterales; por ejemplo, para una portadora de 250 W modulada al 70%, la potencia total en la señal de AM compuesta es

$$P_T = 250 \left(1 + \frac{0.7^2}{2} \right) = 250 (1 + 0.245) = 311.25\text{ W}$$

Del total, 250 W están en la portadora, dejando $311.25 - 250 = 61.25\text{ W}$ en las bandas laterales, o sea, $61.25/2 = 30.625\text{ W}$ en cada una de éstas.

En el mundo real es difícil determinar la potencia de AM midiendo el voltaje de salida y calculando la potencia con la expresión $P = V^2/R$. Sin embargo, es más fácil medir la corriente en la carga. Es muy común ver un amperímetro de RF conectado en serie con una antena para conocer la corriente. Cuando se conoce la impedancia de la antena, la potencia de salida se calcula con facilidad con la fórmula

$$P_T = (I_T)^2 R$$

donde $I_T = I_p \sqrt{1 + m^2/2}$. I_p es la corriente de la portadora sin modulación en la carga y m , el índice de modulación. Por ejemplo, la potencia al 85% y cuya corriente sin modulación sobre una carga de 50Ω de impedancia es 10 A es

$$I_T = 10 \sqrt{1 + \frac{0.85^2}{2}} = 10 \sqrt{1.36125} = 11.67 \text{ A}$$

$$P_T = 11.67^2 (50) = 136.2 (50) = 6809 \text{ W}$$

Ejemplo 3-3

Un transmisor de AM tiene una potencia en la portadora de 30 W y el porcentaje de modulación es de 85%. Calcule a) la potencia total, b) la potencia en una de las bandas laterales.

$$\begin{aligned} \text{a) } P_T &= P_p \left(1 + \frac{m^2}{2} \right) = 30 \left[1 + \frac{(0.85)^2}{2} \right] = 30 \left(1 + \frac{0.7225}{2} \right) \\ &= 30(1.36125) = 40.8 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b) } P_{\text{PBL}} (\text{ambas}) &= P_T - P_p = 40.8 - 30 = 10.8 \text{ W} \\ P_{\text{PBL}} (\text{una}) &= \frac{P_{\text{PBL}}}{2} = \frac{10.8}{2} = 5.4 \text{ W} \end{aligned}$$

Una forma de encontrar el porcentaje de modulación es midiendo la corriente de antena con modulación y sin modulación. Luego, por transformación algebraica de la fórmula anterior, se puede calcular m .

$$m = \sqrt{2 \left[\left(\frac{I_T}{I_p} \right)^2 - 1 \right]}$$

Suponga que la corriente de antena sin modulación es 2.2 A. Esto es, la corriente producida por la portadora sólo o I_p . Si con la modulación la corriente ahora es 2.6 A, el índice de modulación es

$$m = \sqrt{2 \left[\left(\frac{2.6}{2.2} \right)^2 - 1 \right]} = \sqrt{2[(1.18)^2 - 1]} = \sqrt{0.7934} = 0.89$$

El porcentaje de modulación es 89.

Como puede verse, la potencia en las bandas laterales depende del valor del índice de modulación. Mientras más grande sea el porcentaje de modulación, mayor será la potencia de la banda lateral y mayor también la potencia total transmitida. Por supuesto, cuando la portado-

ra se modula al 100%, se tendrá la máxima potencia en cada banda lateral. La potencia en cada banda lateral, P_{PBL} , está dada por la expresión siguiente:

$$P_{PBL} = P_{ELI} = P_{BLS} = \frac{P_p m^2}{4}$$

Si se considera el 100% de modulación en el momento que el factor de modulación $m = 1$, la potencia en cada banda lateral es un cuarto, o 25% de la potencia de la portadora. Como hay dos bandas laterales, la potencia conjunta representa 50% de la potencia de la portadora. Por ejemplo, si tenemos una portadora de 100 W, entonces al 100% de modulación, se tendrán 50 W en las bandas laterales, 25 W en cada una. La potencia total transmitida será entonces la suma de la potencia de la portadora más la de las bandas laterales, o sea, 150 W. La condición más favorable en AM es conservar el índice de modulación, lo más alto posible sin sobremodulación de manera que se transmita la máxima potencia en las bandas laterales.

La potencia de la portadora representa dos tercios de la potencia total transmitida. Si se consideran 100 W y una potencia total de 150 W, el porcentaje de la potencia de la portadora es $100/150 = 0.667$, o 66.7%, el porcentaje de la potencia de las bandas laterales es $50/150 = 0.333$, o 33.3%.

Por sí misma, la portadora no tiene información. La portadora puede transmitirse y recibirse, pero en tanto no ocurra modulación, no se transmitirá información. Cuando hay modulación, se producen las bandas laterales. Por lo tanto, es fácil concluir que toda la información transmitida está dentro dichas bandas. Sólo un tercio de la potencia total transmitida se dedica a las bandas laterales, mientras que los dos tercios restantes es literalmente desperdiciada en la portadora.

En bajos porcentajes de modulación, la potencia en las bandas laterales es todavía más baja; por ejemplo, en una portadora de 500 W y una modulación del 70%, la potencia en cada una de las bandas laterales es

$$P_{PBL} = \frac{P_p m^2}{4} = \frac{500(0.7)^2}{4} = \frac{500(0.49)}{4} = 61.25 \text{ W}$$

y la potencia total en las bandas laterales es 122.5 W. La potencia de la portadora, por supuesto, se mantendrá constante en 500 W.

Como ya se estableció, las señales complicadas de voz y de video varían dentro de un amplio intervalo de amplitud y de frecuencia, y el 100% de modulación sólo ocurre durante los picos de la señal moduladora.

Ejemplo 3-4

Una antena tiene una impedancia de 40 Ω . La señal no modulada de AM produce una corriente de 4.8 A y la modulación es del 90%. Calcule a) la potencia de la portadora, b) la potencia total, c) la potencia de la banda lateral.

$$a) P_p = I^2 R = (4.8)^2 (40) = (23.04) (40) = 921.6 \text{ W}$$

$$b) I_T = I_p \sqrt{1 + \frac{m^2}{2}} = 4.8 \sqrt{1 + \frac{(0.9)^2}{2}} = 4.8 \sqrt{1 + \frac{0.81}{2}} \\ = 4.8 \sqrt{1.405} = 5.7 \text{ A}$$

$$P_T = I_T^2 R = (5.7)^2 (40) = 32.49(40) = 1299.6 \text{ W}$$

$$c) P_{PBL} = P_T - P_p = 1299.6 - 921.6 = 378 \text{ W (189 W cada banda lateral)}$$

Ejemplo 3-5

El transmisor del ejemplo 3-4 experimenta un cambio en la corriente de antena de 4.8 A sin modulación de 5.1 A. ¿Cuál es el porcentaje de modulación?

$$\begin{aligned} m &= \sqrt{2 \left[\left(\frac{I_T}{I_p} \right)^2 - 1 \right]} \\ &= \sqrt{2 \left[\left(\frac{5.1}{4.8} \right)^2 - 1 \right]} \\ &= \sqrt{2[(1.0625)^2 - 1]} \\ &= \sqrt{2(1.13 - 1)} \\ &= \sqrt{2(0.13)} \\ &= \sqrt{0.26} \\ &= 0.51 \end{aligned}$$

El porcentaje de modulación es 51.

Ejemplo 3-6

¿Cuál es la potencia de una de las bandas laterales del transmisor del ejemplo 3-4?

$$P_{PBL} = m^2 \frac{P_p}{4} = \frac{(0.9)^2 (921.6)}{4} = \frac{746.5}{4} = 186.6 \text{ W}$$

Por esta razón, la potencia promedio de las bandas laterales es mucho más baja que su valor ideal de 50%, que sería producido por una modulación del 100%. Con menos potencia en las bandas laterales transmitidas, la señal que se recibe es más débil y la comunicación menos confiable.

No obstante su ineficacia, AM aún se usa bastante debido a que es sencilla y efectiva. Se utiliza en radiodifusión de AM, en radio en la banda civil CB, en radiodifusión de televisión y en algunas comunicaciones aeronáuticas y marinas.

3-5 MODULACIÓN DE BANDA LATERAL ÚNICA

En modulación de amplitud, dos tercios de la potencia que se transmite están en la portadora, que por sí misma no transporta información. La información real está en las bandas laterales. Una forma de mejorar la eficiencia de la modulación de amplitud es eliminar la portadora y suprimir una de las bandas laterales. El resultado es la señal de banda lateral única, BLU (SSB, *single sideband*). La BLU es una forma de AM que ofrece beneficios en algunos tipos de comunicaciones electrónicas.

SEÑALES DE DOBLE BANDA LATERAL

El primer paso para generar una señal de BLU es suprimiendo la portadora, y dejar las bandas laterales superior e inferior. Este tipo de señal se identifica como señal de *doble banda lateral con portadora suprimida*, DBLPS (DSSC, *double sideband suppressed carrier* o DSB, *double sideband*). El beneficio es que no se desperdicia potencia en la portadora. La modulación de doble banda lateral con portadora suprimida es sólo un caso especial de AM sin portadora.

La figura 3-17 muestra un caso típico de una señal de DBL. Esta señal —que es la suma algebraica de las dos bandas laterales senoidales— se produce cuando una portadora se modula mediante una señal de forma senoidal de un solo tono. La portadora se suprime y la señal de DBL en el dominio del tiempo es una onda senoidal en la frecuencia de la portadora, variando en amplitud como muestra la figura. Observe que la envolvente de esta forma de onda no es la misma que la señal modulada, como lo es en una señal pura de AM con portadora. Una característica única de la señal de DBL es la transición de fase que ocurre en la porción de baja amplitud de la onda. Observe en la figura 3-17 que hay dos semiciclos positivos adyacentes en los puntos nulos de la onda. Esta es la forma de cerciorarse en la pantalla de un osciloscopio si la señal que se muestra en realidad es una señal de DBL.

La figura 3-18 muestra una presentación en el dominio de la frecuencia de una señal de DBL. Como se indica, el espacio de espectro que ocupa una señal de DBL es el mismo que el de una señal convencional de AM.

Las señales de doble banda lateral con portadora suprimida, se generan en un circuito llamado *modulador balanceado*. El propósito del modulador balanceado es producir las frecuencias de suma y diferencia para balancear o cancelar la portadora. Los moduladores balanceados se analizan con todo detalle en el capítulo 4.

A pesar de que la eliminación de la portadora en AM de DBL ahorra energía en forma considerable, DBL no se utiliza ampliamente porque es difícil de demodular (recuperar) la señal en el receptor. Sin embargo, en la transmisión de la información de color en una señal de televisión, se tiene una aplicación importante de la DBL.

SEÑALES DE BANDA LATERAL ÚNICA

En las transmisiones de DBL, como las bandas laterales son la suma y diferencia de las señales portadora y moduladora, la información está en ambas bandas laterales. En conclusión, no hay razón de transmitir las dos bandas laterales para recuperar la información.

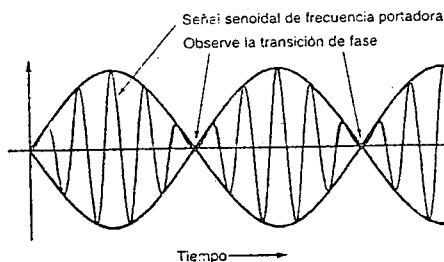


FIGURA 3-17 Presentación en el dominio del tiempo de una señal de DBL.

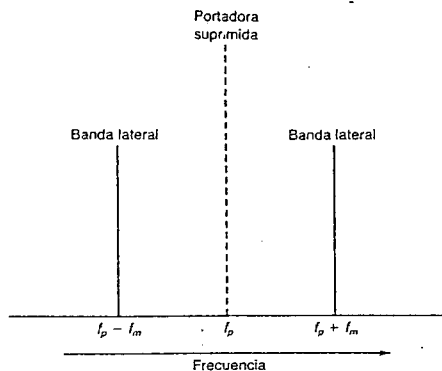


FIGURA 3-18 Presentación en el dominio de la frecuencia de una señal de DBL.

Al suprimir una banda lateral, la que queda se llama *banda lateral única con portadora suprimida* BLUPS (SSSC, *single sideband suppressed carrier* o SSB, *single sideband*). Las señales de BLUPS ofrecen cuatro beneficios principales.

1. El primer beneficio de una señal de BLU es que el espacio de espectro ocupado es sólo la mitad de una señal de AM o de DBL. Esto ayuda a conservar el espacio en el espectro y permite que se transmitan más adelante en el mismo intervalo de frecuencias.
2. Toda la potencia antes asignada a la portadora y la otra banda lateral puede canalizarse a la banda lateral única, produciendo una señal más fuerte que se transportará más lejos y se recibirá con mayor confiabilidad a distancias mayores. En ocasiones, los transmisores de BLU pueden hacerse más pequeños y ligeros que sus equivalentes de AM o de DBL, ya que requerirán menor circuitería y consumirán menos potencia.
3. Debido a que las señales de BLU ocupan un ancho de banda más angosto, se reduce la cantidad de ruido presente en la señal.
4. Hay menos desvanecimiento selectivo en una señal de BLU. Una señal de AM es en realidad un múltiplo de señales, por lo menos la portadora y las dos bandas laterales. Éstas se encuentran en frecuencias diferentes, de manera que son afectadas en formas ligeramente diferentes por la ionosfera y la atmósfera superior, que tienen gran influencia en las señales de radio de menos de alrededor de 50 MHz. La portadora y las bandas laterales pueden arribar al receptor en tiempos ligeramente diferentes causando un corrimiento de fase que a su vez puede propiciar que se sumen en tal forma que se cancelen una a otra en vez de sumarse a la señal original de AM. Esta cancelación, o *desvanecimiento selectivo*, no es problema en BLU ya que sólo se transmite una banda lateral.

Una señal de BLU tiene algunas características no comunes. Primero, cuando no está presente la información o señal moduladora, no se transmite RF. En un transmisor estándar de AM, la portadora se sigue transmitiendo aun cuando no está modulada. Ésta es la condición que puede ocurrir durante una pausa de la voz en la radiodifusora de AM. Pero como no hay transmisión de

¿SABÍA QUE?

A pesar de que al eliminar la portadora en DBL, AM ahorra en forma considerable la potencia, DBL no se utiliza bastante debido a que es difícil demodular la señal en el receptor. Sin embargo, en la transmisión de la información de color en una señal de televisión la DBL se tiene una aplicación importante.

portadora en un sistema de BLU, no hay señales presentes si la señal de información es cero. Las bandas laterales se generan sólo durante el proceso de modulación; por ejemplo, cuando alguien habla por el micrófono. Esto explica por qué BLU es mucho más eficiente que AM.

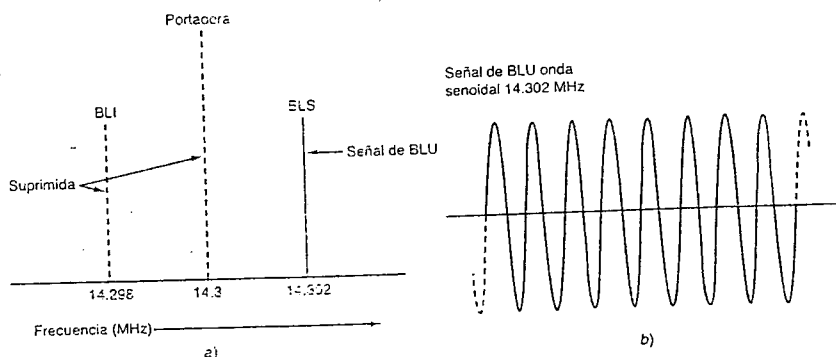


FIGURA 3-19 Señal de BLU producida por una señal senoidal de 2 kHz modulando una portadora senoidal en 14.3 MHz.

La figura 3-19 muestra las representaciones en el dominio de la frecuencia y del tiempo de una señal de BLU producida cuando un tono fijo senoidal de 2 kHz modula a una portadora de 14.3 MHz. En modulación de amplitud se producirían dos bandas laterales en 14.298 y en 14.302 MHz. En BLU sólo se utiliza una banda lateral. La figura 3-19a) muestra que sólo se genera la banda lateral superior. La señal de RF es simplemente una onda senoidal de potencia constante de 14.302 MHz. La figura 3-19b) describe esta señal de BLU en el dominio del tiempo.

Por supuesto, la mayoría de las señales de BLU que se transmiten no son sólo ondas senoidales puras. La señal moduladora más común es la voz, con su contenido de variaciones en frecuencia y amplitud. La señal de voz crea una señal compleja de BLU en RF que varía en frecuencia y amplitud dentro de un espectro angosto definido por el ancho de banda de la señal de voz. La forma de onda a la salida del modulador de BLU tiene la misma apariencia que la forma de onda en banda base, pero ha sido desplazada en frecuencia.

DESVENTAJAS DE LA DBL Y LA BLU

La principal desventaja de las señales de DBL y BLU es que ambas son difíciles de recuperar, o demodular en el receptor. La demodulación depende de la presencia de la portadora. Si ésta no está presente, deberá regenerarse en el receptor y reinsertarse a la señal. Para recuperar fielmente la señal de inteligencia, la portadora reinsertada deberá tener la misma fase y frecuencia que la portadora original. Esto representa un requerimiento difícil. Cuando se utiliza BLU para transmisión de voz, la portadora reinsertada puede hacerse de frecuencia variable para que pueda ajustarse con la mano mientras se escucha, con objeto de recuperar la señal de inteligencia. Esto no es posible con algunas formas de señales de datos.

Para resolver este problema, algunas veces se transmite una portadora de bajo nivel junto con las dos bandas en DBL o con una de ellas en BLU. Como la portadora tiene un nivel de

potencia bajo, se retienen las ventajas de la BLU pero se recibe una portadora débil que luego se amplifica y reinserta para recuperar la información original. Tal portadora de bajo nivel se denomina *portadora piloto*. Esta tecnología se utiliza en los transmisores de FM estéreo, así como en la transmisión de la información del color en la imagen de televisión.

CONSIDERACIONES DE LA POTENCIA DE LA SEÑAL

En AM convencional, la potencia transmitida se distribuye entre la portadora y las dos bandas laterales: por ejemplo, dada una portadora de 400 W con 100% de modulación, cada banda lateral tendrá 100 W de potencia y la potencia total transmitida será 600 W. La potencia efectiva de transmisión es la potencia combinada de las dos bandas laterales, esto es 200 W.

Un transmisor de BLU no envía portadora, así que la portadora es cero. Un transmisor dado de BLU tendrá la misma eficiencia de comunicación que una unidad AM convencional, consumiendo mucho más potencia. Por ejemplo, un transmisor de BLU de 10 W ofrece los mismos resultados y posibilidades que un transmisor de AM que opera con un total de 40 W, ya que ambos muestran 10 W de potencia en una de las bandas. La ventaja en potencia de BLU sobre AM es 4:1.

En BLU la potencia de salida del transmisor se expresa en términos de *potencia pico de la envolvente* (PPE), y representa la máxima potencia producida por los picos de la amplitud de la voz. La PPE se determina con la ecuación $P = V^2/R$. Por ejemplo, suponga que una señal de voz produce una señal de 360 V pico a pico en una carga de 50 Ω . El valor rms del voltaje es 0.707 veces el valor pico y el valor pico es la mitad del voltaje pico a pico. En este ejemplo, el valor rms del voltaje es $0.707 (360/2) = 127.26$ V.

La potencia pico envolvente es entonces:

$$PPE = V^2/R = \frac{(127.26)^2}{50} = 324 \text{ W}$$

La PPE de entrada es sólo la potencia de entrada en cd de la etapa de amplificación final del transmisor, en el instante del valor pico de la voz en la envolvente. Es el voltaje de cd suministrado a la etapa amplificación final multiplicado por la corriente máxima que ocurre en el pico, o sea,

$$PPE = V_a I_{\text{máx}}$$

donde V_a = voltaje de alimentación al amplificador

$I_{\text{máx}}$ = corriente pico

Por ejemplo, una alimentación de 450 V con una corriente pico de 0.8 A produce una PPE de $450(0.8) = 360$ W.

Debe destacarse que los picos de amplitud de la voz se producen sólo en el momento que se generan sonidos intensos durante ciertos patrones de la voz o cuando se enfatiza una palabra o sonido. Durante los niveles normales de voz, los niveles de potencia de entrada y de salida son mucho menores que el nivel PPE. La potencia promedio es por lo común un cuarto o un tercio del valor de PPE tratándose de la voz humana.

$$P_{\text{prom}} = \frac{PPE}{3} \quad \text{o} \quad P_{\text{prom}} = \frac{PPE}{4}$$

SUGERENCIAS Y AYUDAS

Debido a que es difícil demodular las señales de DBL y de BLU, en ocasiones se transmite una señal portadora de bajo nivel junto con la(s) banda(s) lateral(es). Como la portadora es de bajo nivel, se retienen los beneficios de DBL y de BLU. La portadora se amplifica y reinserta para recuperar la información.

Con una PPE de 240 W, la potencia promedio es sólo 60 o 80 W. Los transmisores de BLU se diseñan para manejar sólo el nivel de la potencia promedio sobre una base continua, no la PPE.

Por supuesto que la banda lateral transmitida cambiará en frecuencia y amplitud al aplicarse una señal compleja de voz. Esta banda lateral ocupará el mismo ancho de banda que el de una banda lateral de una señal con su portadora, modulada 100%.

De manera incidental, no importa cuál de las bandas laterales se use, la superior o la inferior, ya que la información está en ambas. Por lo común se utiliza un filtro para remover la banda lateral no deseada.

Ejemplo 3-7

Si un transmisor de BLU producen voltaje de 178 V pico a pico en una carga de antena de 75 Ω , ¿cuál es la PPE?

$$\begin{aligned} V_p &= \frac{V_{p-p}}{2} = \frac{178}{2} = 89 \text{ V} \\ V_{rms} &= 0.707 V_p = 0.707 (89) = 62.9 \text{ V} \\ P &= \frac{V^2}{R} = \frac{(62.9)^2}{75} = 52.8 \text{ W} \\ PPE &= 52.8 \text{ W} \end{aligned}$$

Ejemplo 3-8

Si un transmisor de BLU tiene una fuente de alimentación de 24 Vcd y en los picos de la voz la corriente alcanza un máximo de 9.3 A.

a) ¿Cuál es la PPE?

$$PPE = V_a I_m = 24 (9.3) 223.2 \text{ W.}$$

b) ¿Cuál es la potencia promedio del transmisor?

$$\begin{aligned} P_{prom} &= \frac{PPE}{3} = \frac{223.2}{3} = 74.4 \text{ W} \\ P_{prom} &= \frac{PPE}{4} = \frac{223.2}{4} = 55.8 \text{ W} \\ P_{prom} &= 55.8 \text{ a } 74.4 \text{ W} \end{aligned}$$

APLICACIONES DE DBL Y BLU

Las técnicas de DBL y BLU se utilizan mucho en comunicaciones. Señales puras de BLU se usan en sistemas telefónicos así como en radio de dos vías. En aplicaciones marinas, militares y de aficionados, se utiliza la BLU de dos vías. Las señales de DBL se usan en radiodifusión de FM y de televisión para transmitir señales estéreo en dos canales y para transmitir la información del color de una imagen de televisión. También se usan en algunos tipos de corrimiento de fase por llaveo para transmitir datos binarios.

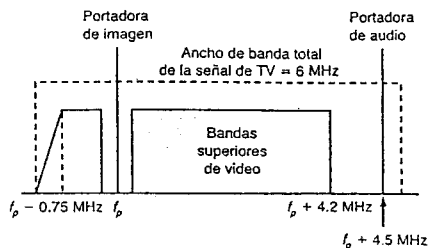


FIGURA 3-20 Transmisión con banda lateral residual de una señal de televisión.

Una forma no usual de AM, es la que se usa en la radiodifusión de televisión. Una señal de televisión consiste en la señal de video (la imagen) y la señal de audio, las cuales tienen portadoras diferentes. La portadora de audio está modulada en frecuencia, pero la información de video modula en amplitud a la portadora de la imagen. Dicha portadora se transmite, pero una banda lateral se suprime en forma parcial.

La información de video tiene por lo común frecuencias tan altas como 4.2 MHz. Una señal de televisión modulada por completo en amplitud ocuparía entonces $2(4.2) = 8.4 \text{ MHz}$. Esta cantidad es excesiva en ancho de banda y representa un desperdicio de espacio en el espectro, ya que no es necesario el total de éste para transmitir de manera confiable la señal de televisión. Para reducir el ancho de banda a los 6 MHz asignados por la FCC para las señales de televisión, se suprime una porción de la banda lateral inferior, dejando sólo una pequeña parte o vestigio de la banda lateral inferior. Este arreglo llamado *banda lateral residual* se ilustra en la figura 3-20. Las señales de video arriba de 0.75 MHz (750 kHz) se eliminan en la banda lateral (residual), en tanto que todas las frecuencias de video se transmiten en la banda lateral superior.

SUGERENCIAS Y AYUDAS

Para transmisiones de BLU no importa dónde se utilice la banda lateral superior o inferior, siempre y cuando la información esté contenida en ambas.

3-6 CLASIFICACIÓN DE LAS EMISIONES DE RADIO

La figura 3-21 muestra los códigos que se utilizan para designar los muchos tipos de señales que pueden transmitirse por radio o líneas físicas. El código básico se forma de una mayúscula y un número, seguidos por letras minúsculas para definiciones más específicas. Por ejemplo, una señal de voz de AM básica como la que se oye en la banda de radiodifusión de AM o en la banda ciudadana o en el radio de una aeronave tiene el código A3. Todas las variaciones de AM que usan señales de inteligencia de voz o video, tienen la designación A3, pero las letras minúsculas se emplean para distinguirlas. A continuación, se dan ejemplos de los códigos designados a las señales descritas en este capítulo.

- DBL dos bandas laterales portadora completa = A3
- DBL dos bandas laterales portadora suprimida = A3_b
- BLU banda lateral única portadora suprimida = A3_j
- BLU banda lateral única 10% portadora piloto = A3_i
- Banda lateral residual TV = A3_c
- OOK y ASK = A1

Letra	A	Modulación de amplitud
	F	Modulación de frecuencia
	P	Modulación de fase
Número	0	Portadora encendida, no hay mensaje (radio faro)
	1	Portadora encendida apagada, no hay mensaje (código morse, radar)
	2	Portadora encendida tono de llaveo encendido apagado (código)
	3	Telefonía, mensaje como voz o música
	4	Fax, gráficas estáticas (TV con barrido lento)
	5	Banda lateral residual (TV comercial)
	6	Telegrafía cuatro frecuencias
	7	Bandas múltiples c/u con mensajes diferentes
	8	
	9	General (las demás)
Subíndices	Ninguno	Doble banda lateral, portadora completa
	a	Banda lateral única, portadora reducida
	b	Doble banda lateral, sin portadora
	c	Banda lateral residual
	d	Sólo pulsos de portadora, modulación por amplitud de pulsos (PAM, <i>pulse amplitude modulation</i>)
	e	Sólo pulsos de portadora, modulación por ancho de pulsos (PWM)
	f	Sólo pulsos de portadora, modulación por posición de pulsos (PPM, <i>pulse position modulation</i>)
	g	Pulsos cuantificados, video digital
	h	Banda lateral única, portadora completa
	j	Banda lateral única, sin portadora

FIGURA 3-21 Designación de los códigos de las emisiones de radio.

Observe que hay designaciones especiales para las transmisiones de fax y de pulsos y que el número 9 cubre cualquier otro tipo o técnica de modulación especial no cubierta en otra parte. Cuando un número precede a la letra, éste se refiere al ancho de banda en kHz; por ejemplo, la designación 10A3 describe una señal de AM de 10 kHz de ancho de banda. La designación 20A3h describe una señal con portadora completa y frecuencia de mensaje de 20 kHz.

La figura 3-22 es otro sistema de describir una señal. Es similar al método recién descrito, pero con algunas variaciones. Ésta es la definición que utiliza la organización de estándares de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunications Union*).

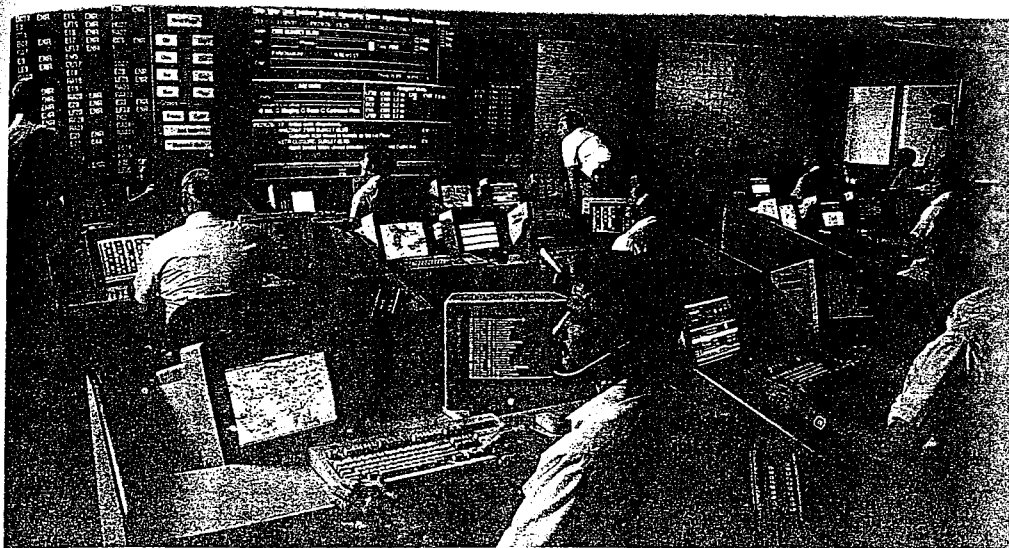
Algunos ejemplos son:

A3F TV analógica modulación de amplitud

J3E Banda lateral única voz

F2D Datos modulación por cambio de frecuencias

G7E Señales múltiples, modulación de fase voz



El centro de comando de emergencia del departamento de bomberos de Los Angeles, requiere de sistemas avanzados de comunicaciones para manejar el alto número de llamadas de emergencia.

Tipo de modulación

- N Portadora sin modular
- A Modulación de amplitud
- J Banda lateral única
- F Modulación de frecuencia
- G Modulación de fase
- P Series de pulsos, sin modular

Tipo de señales moduladoras

- 0 Ninguna
- 1 Digital, canal único, sin modular
- 2 Digital, canal único, con modular
- 3 Analógico, canal único
- 7 Digital, dos o más canales
- 8 Analógico, dos o más canales
- 9 Analógico más digital

Tipo de señales de inteligencia

- N Ninguna
- A Telegrafía, humana
- B Telegrafía, máquina
- C Fax
- D Datos, telemetría, señales de control
- E Telefonía (voz humana)
- F Vídeo TV
- W Algunas combinaciones de cualquiera de las anteriores

FIGURA 3-22 Designación de emisiones ITV.

RESUMEN

En modulación de amplitud, un incremento o disminución de la amplitud de la señal moduladora causa un incremento o disminución correspondiente en los picos positivo y negativo de la amplitud de la portadora. Al interconectar los picos adyacentes positivos o negativos de la forma de onda de la portadora, se obtiene la forma de la señal de información moduladora, denominada envolvente.

Mediante funciones trigonométricas podemos formar expresiones matemáticas para la portadora y la señal moduladora y combinarlas para crear una fórmula de la onda modulada completa. Los moduladores (circuitos que realizan modulación de amplitud) obtienen el producto de las señales portadoras y moduladoras.

La relación entre las amplitudes de la señal moduladora y la portadora, se expresa como el índice de modulación (m), un número entre 0 y 1. Si la amplitud del voltaje de la señal moduladora es mayor que la de la portadora, $m > 1$, ocurrirá distorsión o sobremodulación.

Cuando una portadora se modula mediante una señal de información, se generan nuevas señales a diferentes frecuencias. Estas frecuencias laterales o bandas laterales se presentan en el espectro de frecuencias directamente arriba y abajo de la frecuencia portadora. Una señal de AM consta de varios voltajes, de la portadora y de las dos bandas laterales, cada una de las cuales introduce potencia en la antena. La potencia total transmitida es la suma de las potencias de la portadora y de las dos bandas laterales.

Las señales de AM pueden expresarse por medio de representaciones en el dominio del

tiempo o en el dominio de la frecuencia o también mediante representaciones fasoriales.

En la transmisión de AM, dos tercios de la potencia transmitida están en la portadora que por sí misma no proporciona información. Para corregir este efecto de desperdicio se suprime la portadora. Cuando esta portadora se suprime de inicio, quedan sólo las bandas laterales superior e inferior, dejando una señal de doble banda lateral con portadora suprimida (DBLPS). En vista de que no son necesarias para transmitir la información deseada, puede eliminarse una de las dos bandas laterales dejando sólo una señal de banda lateral única (BLU). Las señales de BLU ofrecen beneficios importantes: conservan espacio en el espectro, producen señales más fuertes, reducen el ruido y reducen los efectos de atenuación sobre grandes distancias.

En BLU, la potencia de los transmisores se expresa como potencia pico de la envolvente (PPE), o sea, la máxima potencia producida por los picos de amplitud de la voz.

Tanto la técnica de DBL como la de BLU se utilizan mucho en comunicaciones. Señales puras en BLU se utilizan en sistemas de telefonía así como en radio de dos vías. Las comunicaciones de dos vías en BLU se usan en aplicaciones marinas, militares y por los radioaficionados. En algunas aplicaciones de televisión, para reducir el ancho de banda de la señal a los 6 MHz asignados por la FCC para las señales de televisión, se utiliza una señal de banda lateral residual para suprimir parte de la banda lateral inferior de la señal de televisión.

TÉRMINOS CLAVE

Banda lateral
Banda lateral única, con portadora suprimida (BLUPS)
Corrimiento de la amplitud por llaveo

Distorsión
Doble banda lateral con portadora suprimida (DBLPS)
Envolvente
Fasor

Índice de modulación
Llaveo ENCENDIDO-APAGADO
Modulación
Modulación de banda lateral única

Modulación de doble banda lateral
Modulación por pulsos
Porcentaje de modulación
Potencia pico de la envolvente

Presentación en el dominio del tiempo
Representación en el dominio de la frecuencia
Señal de banda lateral residual

Sobremodulación
Transmisión de onda continua



REPASO

PREGUNTAS

1. Defina modulación.
2. Explique por qué es necesaria o deseable la modulación.
3. Dé el nombre del circuito que causa que una señal module a otra y dé los nombres de las dos señales aplicadas al circuito.
4. ¿Cómo varía la portadora de AM con relación a la señal de información?
5. Falso o verdadero. ¿La frecuencia de la portadora es en general menor que la de la moduladora?
6. ¿Cómo se llama la línea exterior de los picos de la señal de la portadora y qué forma tiene?
7. ¿Cómo se llaman los voltajes que varían en el tiempo?
8. Escriba la expresión trigonométrica para una señal senoidal portadora.
9. Falso o verdadero. ¿La frecuencia de la portadora se mantiene constante durante AM?
10. ¿Qué operación matemática realiza un modulador de amplitud?
11. ¿Cuál es la relación ideal entre el voltaje de la señal de modulación (V_m) y el voltaje de la portadora (V_p)?
12. ¿Cómo se llama el índice de modulación cuando se expresa en términos de porcentaje?
13. Explique los efectos de un porcentaje de modulación mayor que 100.
14. ¿Cuál es el nombre dado a las nuevas señales que genera el proceso de modulación?
15. ¿Cuál es el nombre del tipo de señal que se presenta en un osciloscopio?
16. ¿Cómo se llama al tipo de señal cuyos componentes de amplitud se presentan con respecto a la frecuencia y en qué instrumentos se exhiben?
17. Explique por qué las señales complejas no senoidales y las señales distorsionadas producen una señal de AM de mayor ancho de banda que una señal simple senoidal de la misma frecuencia.
18. ¿Qué tres señales pueden sumarse para dar una señal de AM?
19. ¿Qué nombre se da a una señal de AM cuya portadora es modulada por pulsos binarios?
20. ¿Cuál es el valor de la representación en fasorial de una señal de AM?
21. Falso o verdadero. ¿La señal moduladora aparece en el espectro de salida de una señal de AM?
22. ¿Qué porcentaje de la potencia total de una señal de AM está en la portadora? ¿En una banda lateral? ¿En ambas bandas laterales?
23. ¿Qué tipo de carga se emplea para disipar la señal de AM?
24. ¿Tiene la portadora de una señal de AM alguna información? Explique.
25. ¿Cuál es el nombre de la señal que tiene ambas bandas laterales, pero no tiene portadora?
26. ¿Cuál es el nombre del circuito que se utiliza para eliminar la portadora en transmisiones de DBL y de BLU?

REPASO





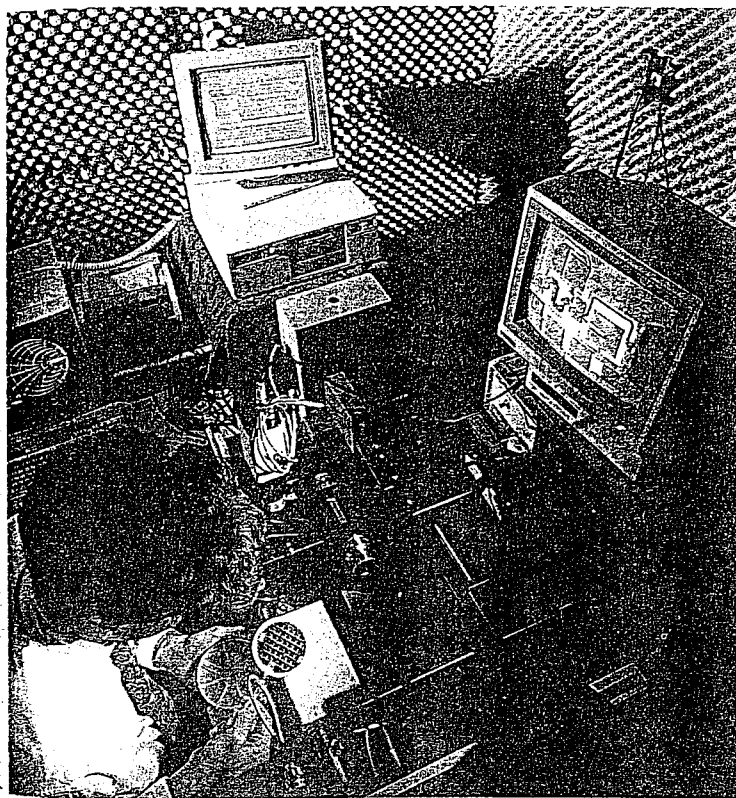
27. ¿Cuál es la señal mínima de AM que puede transmitirse y todavía conservar la inteligencia necesaria?
28. Indique los cuatro beneficios principales de BLU sobre AM convencional.
29. Mencione dos aplicaciones para BLU y dos para DBL.
30. Mencione el tipo de AM que se utiliza para la transmisión de imágenes de televisión. ¿Por qué se usa? Dibuja un espectro en el dominio de la frecuencia de la señal de televisión.
31. Con base en las figuras 3-21 y 3-22, escriba las designaciones para la señal de una estación de radio de frecuencia modulada y para una señal de fax analógica modulada en amplitud.

PROBLEMAS

1. Dé la fórmula para el índice de modulación y explique sus términos.
2. Una onda de AM en un osciloscopio tiene valores de $V_{\max} = 4.8$ y $V_{\min} = 2.5$ leídos en la cuadrícula. ¿Cuál es el porcentaje de modulación?
3. ¿Cuál es el porcentaje de modulación ideal para la transmisión de la máxima amplitud de información?
4. ¿Qué amplitud de señal de modulación, V_m , se necesita para obtener 75% de modulación de una portadora $V_p = 50$ V?
5. Si el valor máximo pico a pico de una onda de AM es 45 V y el valor pico a pico de la señal moduladora es 20 V, ¿cuál es el porcentaje de modulación?
6. ¿Cuál es la relación matemática de los voltajes de la portadora y de la señal moduladora cuando ocurre la sobremodulación?
7. Un transmisor de radio de AM que opera en 3.9 MHz, es modulado por señales de frecuencia de hasta 4 kHz. ¿Cuáles son las frecuencias laterales máximas superior e inferior? ¿Cuál es el ancho de banda total de la señal de AM?
8. ¿Cuál es el ancho de banda de una señal de AM cuya portadora es de 2.1 MHz modulada por una onda cuadrada de 1.5 kHz con armónicas que son significativas hasta la quinta? Calcule todas las bandas laterales superiores e inferiores producidas.
9. ¿Qué tanta potencia aparece en una banda lateral de una señal de AM de un transmisor de 5 kW modulada al 80%?
10. ¿Cuál es la potencia total suministrada por un transmisor de AM con una portadora de 2 500 W y un porcentaje de modulación de 77%?
11. Si una señal de AM tiene una portadora de 12 W y 1.5 W en cada una de sus bandas laterales, ¿cuál es el porcentaje de modulación?
12. Un transmisor de AM pone una portadora de 6 A en una antena cuya resistencia es de 52 Ω . Si se modula al 60%, ¿cuál es la potencia total de salida?
13. La corriente de antena que produce una portadora modulada es de 2.4 A en una antena con resistencia de 75 Ω . Cuando se modula, la corriente de antena sube a 2.7 A. ¿Cuál es el porcentaje de modulación?
14. Si un transmisor de radioaficionado tiene una potencia en la portadora de 750 W, ¿cuánta potencia más se añade a la señal cuando el transmisor se modula al 100%?
15. Un transmisor de BLU tiene una fuente de voltaje de alimentación de 250 V. En los picos de la voz, el amplificador final toma una corriente de 3.3 A. ¿Cuál es la potencia pico envolvente, PPE?
16. En un transmisor de BLU, el voltaje de salida pico a pico de 675 V aparece a través de la resistencia de antena en los picos de la voz. ¿Cuál es la potencia pico envolvente, PPE?
17. ¿Cuál es la potencia promedio de un transmisor de BLU considerado como de 100 W PPE?
18. Un transmisor de BLU con una portadora de 2.3 MHz se modula por medio de una señal de inteligencia en el intervalo de 150 Hz a 4.2 kHz. Calcule el intervalo de frecuencia de la banda lateral inferior.

PREGUNTAS PARA REFLEXIONAR

1. ¿Se puede enviar una señal de inteligencia sin una portadora? ¿Si es así cómo?
2. ¿Cómo se expresa la potencia de un transmisor de BLU?
3. Una subportadora de 70 kHz se modula en amplitud por tonos de 2.1 kHz y 6.8 kHz. La señal de AM resultante es luego utilizada para modular una portadora de 12.5 MHz. Calcule todas las frecuencias de las bandas laterales de la señal compuesta y trace o dibuje la señal en el dominio de la frecuencia. Suponga 100% de modulación. ¿Cuál es el ancho de banda que ocupa la señal completa?
4. Explique cómo podría transmitir dos señales en bandas bases independientes mediante BLU en una frecuencia portadora común.
5. Una señal de AM con 100% de modulación tiene una potencia de 32 W en la banda lateral superior. ¿Cuál es la potencia de la portadora?
6. ¿Puede una señal de información tener una frecuencia mayor que la de la señal portadora? ¿Qué pasaría si una señal de 1 kHz modulara en amplitud a una portadora de 1 kHz?



Este técnico está probando circuitos de radiofrecuencia en un chip semiconductor.

R
E
P
A
S
O

